

TABLA DE CONTENIDO GENERAL

RESUMEN

GLOSARIO

CAPITULO 1	42
INTRODUCCIÓN.....	42
1.1 OBJETIVOS	43
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	43
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	43
1.2 JUSTIFICACIÓN	44
1.3 ZONA DE ESTUDIO	45
1.4 ALCANCES	48
1.5 ACTIVIDADES.....	49
1.6 PERSONAL	62
1.7 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	62
CAPITULO 2	65
ANTECEDENTES	65
2.1 ANTECEDENTES DE PROCESOS	65
2.2 ESTUDIOS ANTERIORES	74
2.2.1 DISEÑOS DEFINITIVOS DETALLADOS, PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS DE ADECUACIÓN, CONTROL DE CRECIENTES Y DESCONTAMINACIÓN A TRAVÉS DE INTERCEPTORES, COLECTORES, PARA TODAS LAS QUEBRADAS DE LA PARTE SURORIENTAL DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ D.C., INCLUIDAS EN LAS LOCALIDADES DE SANTA FÉ, SAN CRISTÓBAL, RAFAEL URIBE URIBE Y USME.	74
2.2.2 USO ACTUAL DE LAS TIERRAS DE LA RESERVA FORESTAL DEL BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ..	77
2.2.3 PLAN DE MANEJO RESERVA FORESTAL PROTECTORA BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ	82

2.2.4 ESTUDIO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y ÁREAS CIRCUNDANTES BASADO EN EL MANEJO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA REPÚBLICA DE COLOMBIA- INFORME DE RESULTADOS.....	86
2.2.5 ESTUDIO DE LA LADERA OCCIDENTAL DEL BARRIO LAURELES, MEDIDAS CORRECTIVAS Y DE MITIGACIÓN PARA ESTABILIZAR LA ZONA DE ESTUDIO.....	95
2.2.6 ESTUDIO GEOTÉCNICO DE VALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL BARRIO RAMAJAL UBICADO EN LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL.....	97
2.2.7 DISEÑO E INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DE LOS BARRIOS MANILA Y GRAN COLOMBIA.	101
2.2.8 ESTUDIO DE ZONIFICACIÓN DE RIESGOS POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LOS BARRIOS EL TRIANGULO, TRIANGULO ALTO Y CORINTO EN LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL EN SANTA FE DE BOGOTÁ D.C.	104
2.2.9 ESTUDIO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO FUCHA EN LAS LOCALIDADES DE SAN CRISTÓBAL, KENNEDY Y FONTIBÓN Y RECOMENDACIONES DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN	114
2.2.10 ESTUDIO GEOTÉCNICO DETALLADO DEL BARRIO MORALBA	116
2.2.11 ESTUDIO BÁSICO PARA LA CONFORMACIÓN DE UN PARQUE MINERO INDUSTRIAL PARA EL ORDENAMIENTO Y DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD EXTRACTIVA Y TRANSFORMADORA DE MINERALES ARCILLOSOS CON FINES A LA DESMARGINALIZACIÓN DE BARRIOS DEL DISTRITO CAPITAL	118
2.2.12 ESTUDIO DE RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA DEL PROYECTO PARQUE RESIDENCIAL SAN JERÓNIMO DEL YUSTE.....	119
2.2.13 ESTUDIO SOBRE PREVENCIÓN DE DESASTRES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BOGOTÁ EN LA REPÚBLICA DE COLOMBIA	126
2.2.14 PROYECTO CONVENIO DE COOPERACIÓN PARA EL CUIDADO Y DEFENSA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO FUCHA, MEDIANTE EL FORTALECIMIENTO DE LA PARTICIPACIÓN SOCIAL EN CONSERVACIÓN EN LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL, BOGOTÁ.D.C, REALIZADO ENTRE LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ Y LA ORGANIZACIÓN NO GUBERNAMENTAL ENDA A.L.	131
2.2.15 HISTORIA URBANA DE BOGOTÁ	134
CAPITULO 3	141
MARCO CONCEPTUAL.....	141
3.1 FLUJOS DE DETRITOS E INUNDACIONES	141
3.2 AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO	155
3.3 MANEJO DEL RIESGO	157

CAPITULO 4	188
MARCO TEÓRICO	188
4.1 GEOLOGÍA.....	188
4.2 GEOMORFOLOGÍA	205
4.2.1 GEOMORFOLOGÍA COMO CIENCIA.....	207
CONEXIÓN CON GEOLOGÍA, CLIMATOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y BIOGEOGRAFÍA	207
CONCEPTOS BÁSICOS DE GEOMORFOLOGÍA	208
CLAVES DE FOTOINTERPRETACION	209
GEOFORMAS	216
4.2.2 MAPEO GEOMORFOLÓGICO	217
4.3 HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA.....	218
4.3.1 CARACTERÍSTICAS FISIográfICAS DE LA CUENCA.....	218
4.3.2 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA.....	222
ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	222
ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN EN LA CUENCA.....	223
4.4 COBERTURA Y USO DEL SUELO	231
4.4.1 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN.....	233
4.4.2 INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES APLICADA AL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA	242
4.5 INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS Y PROCESOS EROSIVOS	248
4.6 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA.....	248
4.6.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	249
SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL	249
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	250
4.6.2 REFRACCIÓN SÍSMICA	251
4.7 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR PROCESOS EROSIVOS	252
4.7.1 MODELO FUNDAMENTAL DE EROSIÓN.....	253
4.7.2 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO REVISADA (RUSLE).....	255
4.8 ANÁLISIS DE INESTABILIDAD DE LAS BANCAS POR PROCESOS DE SOCAVACIÓN	263
4.8.1 CALCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN LOS PUNTOS DE INTERÉS	264
4.8.2 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD	264
4.9 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LAS LADERAS DE LA CUENCA.....	267
4.9.1 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AGUA	267

4.9.2	INFILTRACIÓN Y AVANCE DEL FRENTE HÚMEDO	270
4.9.3	ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO.....	271
4.9.4	ANÁLISIS DE BLOQUE DESLIZANTE – NEWMARK.....	273
4.10	PROPAGACIÓN DE FLUJOS	281
4.11	EVALUACIÓN DE AMENAZA	302
4.11.1	DE DESLIZAMIENTOS	302
4.11.2	DE FLUJOS Y AVALANCHAS	314
4.12	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	316
4.12.1	VULNERABILIDAD FÍSICA.....	316
4.12.2	VULNERABILIDAD SOCIAL	325
4.13	CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO	330
4.13.1	RIESGO ECONÓMICO	330
4.13.2	RIESGO SOCIAL.....	331
CAPITULO 5		340
METODOLOGÍA		340
5.1	TOPOGRAFÍA	340
5.1.1	TOPOGRAFÍA GENERAL.....	340
5.1.2	TOPOGRAFÍA PARTICULAR.....	347
5.2	GEOLOGÍA.....	349
5.3	GEOMORFOLOGÍA	352
5.4	FOTOINTERPRETACIÓN DE PROCESOS DENUDACIONALES	354
5.4.1	REVISIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS	354
5.4.2	CRITERIOS DE ESCOGENCIA	354
5.4.3	PREPARACIÓN DEL MATERIAL	355
5.4.4	FOTOINTERPRETACIÓN.....	355
5.4.5	RESULTADOS.....	355
5.5	HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA	356
5.5.1	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	356
5.5.2	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LLUVIAS EN LA CUENCA	356
5.5.3	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE CAUDALES EN LA CUENCA	356
5.5.4	CALIBRACIÓN DE UN MODELO LLUVIA ESCORRENTÍA	357
5.5.5	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIENTE.....	357
5.5.6	AFOROS DE CAUDAL.....	357

5.5.7	ANÁLISIS HIDRÁULICOS.....	363
5.6	GEOTECNIA	365
5.6.1	INVENTARIO DE PROCESOS.....	365
5.6.2	INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO.....	367
5.7	COBERTURA Y USO DEL SUELO	369
5.7.1	CARACTERIZACIÓN URBANA.....	369
5.7.2	INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES APLICADA AL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA	377
5.8	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS POR PROCESOS EROSIVOS	378
5.8.1	CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD, R	379
5.8.2	CÁLCULO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO, K.....	381
5.8.3	CÁLCULO DE LOS FACTORES TOPOGRÁFICOS L Y S.....	381
5.8.4	CÁLCULO DEL FACTOR DE COBERTURA, C	381
5.8.5	CÁLCULO DEL FACTOR DE PRÁCTICAS DE PROTECCIÓN, P	383
5.8.6	CONSIDERACIONES GENERALES A TENER EN CUENTA EN LA EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS.....	384
5.9	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS PRODUCIDOS POR INESTABILIDAD DE LAS BANCAS POR PROCESOS DE SOCAVACIÓN.....	385
5.10	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS PRODUCIDOS POR INESTABILIDAD DE LAS LADERAS	386
5.11	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.....	388
5.11.1	ESCENARIOS DE ANÁLISIS.....	388
5.11.2	ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA	396
5.12	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	397
5.12.1	VULNERABILIDAD FÍSICA	397
5.12.2	VULNERABILIDAD SOCIAL	407
5.13	VALORACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS	426
5.13.1	AVALÚOS MASIVOS ZONAS URBANAS	427
5.13.2	AVALÚOS DE LAS ZONAS RURALES	429
5.14	ESTIMACIÓN DEL RIESGO	431
CAPITULO 6		439
INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA CUENCA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL.....		439
6.1	TOPOGRAFIA	439
6.1.1	TOPOGRAFÍA GENERAL.....	439

6.1.2	TOPOGRAFÍA PARTICULAR	439
6.2	GEOLOGÍA.....	440
6.2.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	440
6.2.2	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	444
6.2.3	LITOLOGÍA	445
6.2.4	TECTÓNICA.....	492
6.2.5	ESTRUCTURAS.....	498
6.3	GEOMORFOLOGÍA	507
6.3.1	MORFOESTRUCTURAL	509
6.4	MORFODINÁMICA.....	521
6.4.1	METEORIZACIÓN	522
6.4.2	EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL CONCENTRADA	522
6.4.3	REMOCIÓN EN MASA	525
6.5	GEOTECNIA	532
6.5.1	EVENTOS PREVIOS.....	532
6.5.2	INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	536
6.5.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BASE DE DATOS DEL INVENTARIO	539
6.5.4	EXPLORACIÓN DE CAMPO	550
6.6	COBERTURA Y USO DEL SUELO	562
6.6.1	INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES APLICADA AL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA	562
6.6.2	CONTROL DE CAMPO MAPA DE USO Y COBERTURA	594
6.6.3	ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL.....	619
6.6.4	ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA.....	623
CAPITULO 7		638
SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE PROCESOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL.....		638
7.1	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS POR PROCESOS EROSIVOS	638
7.1.1	FACTOR DE EROSIVIDAD, R	638
7.1.2	FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO, K.....	646
7.1.3	FACTORES TOPOGRÁFICOS L Y S.....	647
7.1.4	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA, C.....	648
7.1.5	FACTOR DE PRÁCTICAS DE PROTECCIÓN, P	649
7.1.6	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN	650

7.2	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS POR PROCESOS DE INESTABILIDAD DE LAS BANCAS	651
7.3	EVALUACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS POR PROCESOS DE INESTABILIDAD DE LAS LADERAS	660
7.4	HIDROLOGÍA	666
7.4.1	CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LA CUENCA.....	666
7.4.2	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA EN LA CUENCA	672
7.4.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CAUDALES EN LA CUENCA.....	685
7.4.4	ANÁLISIS DE COHERENCIA ENTRE LOS DATOS DE LLUVIA Y CAUDAL	687
7.5	ESTIMACIÓN DE HIDROGRAMAS DE CAUDAL EN LA CUENCA.....	694
7.5.1	CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES.....	694
7.5.2	INFORMACIÓN INICIAL DISPONIBLE	695
7.5.3	SIMULACIÓN DE CAUDALES CON EL MODELO HC-HMS	715
7.5.4	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO LLUVIA - ESCORRENTÍA.....	716
7.5.5	RESULTADOS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO DE EVENTO DE LLUVIA	723
7.5.6	AFOROS DE CAUDAL CON TRAZADORES IÓNICOS.....	735
7.6	HIDRAULICA.....	739
7.6.1	LIMITACIONES DE LOS MODELOS EMPLEADOS EN LOS ANÁLISIS	740
7.6.2	HIDROGRAMAS DE CAUDAL LÍQUIDO	741
7.6.3	GRANULOMETRÍAS DEL LECHO	741
7.6.4	DATOS DE ENTRADA AL MODELO HEC-RAS	746
7.6.5	COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN EL CAUCE.....	747
7.6.6	CONDICIONES DE BORDE	749
7.6.7	ANÁLISIS DE NIVELES Y CAUDALES EN EL RÍO SAN CRISTÓBAL	750
7.6.8	CAPACIDAD HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS SOBRE EL CAUCE DEL RÍO SAN CRISTÓBAL ...	752
7.7	MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO EMPLEANDO EL SOFTWARE FLO-2D	759
7.7.1	ESCENARIOS DE MODELACIÓN	759
7.7.2	DATOS DE ENTRADA AL MODELO	760
7.7.3	CONSIDERACIONES GENERALES PARA LAS SIMULACIONES.....	762
7.7.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO FLO-2D A LOS CAMBIOS EN LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.....	763
7.7.5	ESCENARIO I	766
7.7.6	ESCENARIO II	774
7.7.7	ESCENARIO III	782
7.7.8	ESCENARIO IV	790

7.7.9	ESCENARIO V (ALTERNATIVA CON OBRAS)	797
7.7.10	ESCENARIO VI	800
CAPITULO 8		813
ESTIMACIÓN DEL RIESGO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL		813
8.1	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA	816
8.2	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	816
8.2.1	VULNERABILIDAD FÍSICA DE EDIFICACIONES	816
8.2.2	VULNERABILIDAD DE LÍNEAS VITALES	827
8.2.3	VULNERABILIDAD SOCIAL	828
8.3	VALORACIÓN DE COSTOS	829
8.3.1	VALORACIÓN DEL ÁREA URBANA	829
8.3.2	VALORACIÓN DEL ÁREA RURAL	840
8.3.3	PÉRDIDAS ECONÓMICAS COMERCIO Y COBERTURA	845
8.4	ESTIMACIÓN DEL RIESGO ECONÓMICO	850
8.5	ESTIMACIÓN DEL RIESGO SOCIAL	859
CAPITULO 9		863
ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN		863
9.1	SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA (SAT) CONTRA INUNDACIONES	863
9.1.1	INTRODUCCIÓN	863
9.1.2	DEFINICIÓN	868
9.1.3	OBJETIVOS	870
9.1.4	TIPOS DE SAT	871
9.1.5	ESTRUCTURA DE UN SAT	874
9.1.6	INSTRUMENTOS	882
9.1.7	APLICACIÓN A LA CUENCA PILOTO	897
9.2	IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES REQUERIDAS PARA MITIGAR LA VULNERABILIDAD POR INUNDACIONES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL	917
9.3	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS OBRAS A IMPLEMENTAR	946

CAPITULO 10	950
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	950

LISTADO DE TABLAS

TABLA 2 1. CONCEPTOS TÉCNICOS RECOPIADOS EN EL SIRE, UBICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.	67
TABLA 2 2. LEYENDA DE COBERTURA DE LA RESERVA FORESTAL BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ.	79
TABLA 2 3. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES CARTOGRÁFICAS DE USO DE TIERRAS DE LA RESERVA FORESTAL BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ.	81
TABLA 2 4. LEYENDA DE COBERTURA DEL SUELO (CAR - 2006).	86
TABLA 2 5. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LA RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN BOGOTÁ.	90
TABLA 2 6. RESULTADOS DEL ESTUDIO PILOTO.	91
TABLA 2 7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO SOCIO-ECONÓMICO A TRAVÉS DE ENTREVISTAS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA.	92
TABLA 2 8. PARÁMETROS DE RESISTENCIA.	96
TABLA 2 9. PROBABILIDAD DE FALLA.	97
TABLA 2 10. PARÁMETROS DE RESISTENCIA.	100
TABLA 2 11. FACTORES DE SEGURIDAD.	110
TABLA 2 12. CATEGORÍAS DE VULNERABILIDAD.	112
TABLA 2 13. CATEGORÍAS DE RIESGO.	113
TABLA 2 14. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS ESTUDIO GEOTÉCNICO DETALLADO DEL BARRIO MORALBA	117
TABLA 2 15. CAUDALES.	121
TABLA 3 1. LIMITES DE RIESGO TOLERABLE, AGS.	175
TABLA 4 1. AGENTES Y PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS. (TOMADO DE VILLOTA, 1991).	206
TABLA 4 2. CLAVES FOTOGEOLÓGICAS (1)	209
TABLA 4 3. CLAVES FOTOGEOLÓGICAS (2)	210
TABLA 4 4. SISTEMAS MONTAÑOSOS Y COLINADOS (SEGÚN VILLOTA, 1991).	216
TABLA 4 5. SISTEMAS AGRADACIONALES (SEGÚN VILLOTA, 1991).	217
TABLA 4 6. PRECIPITACIÓN ACUMULADA PARA TRES NIVELES DE CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE	227

TABLA 4 7. PROVINCIAS FISIGRÁFICAS EN COLOMBIA.....	240
TABLA 4 8. ALGUNOS EJEMPLOS DE PAISAJES CORRESPONDIENTES A GRANDE PAISAJES. TOMADO DE VILLOTA (1992).....	241
TABLA 4 9. CLASE DE ESTRUCTURA.....	260
TABLA 4 10. CÓDIGO DE PERMEABILIDAD.....	261
TABLA 4 11. NIVELES DE AMENAZA Y DE ESTABILIDAD RELATIVA CON BASE EN LOS DESPLAZAMIENTOS Y ACELERACIONES CRÍTICAS PROPUESTAS POR LEGG ET AL., 1982 (ADAPTADO DE LIN, 1990).....	280
TABLA 4 12. TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DE DE MOMENTUM PARA UN CANAL ALUVIAL ESCARPADO. ..	293
TABLA 4 13. CRITERIOS PARA SELECCIONAR LA ECUACIÓN DE TRÁNSITO (CORPS OF ENGINEERS, TECHNICAL ENGINEERING AND DESIGN GUIDELINES No. 19, 1997).....	294
TABLA 4 14. ESFUERZO DE CEDENCIA Y VISCOSIDAD COMO UNA FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS.....	302
TABLA 4 15. MODELO DE INDICADORES.....	327
TABLA 4 16. INDICADORES DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS PARA EL ÍNDICE DE RIESGO.....	330
TABLA 5 1. SECTORES CATASTRALES.....	341
TABLA 5 2. SISTEMA DE COORDENADAS OFICIAL DE BOGOTÁ.....	341
TABLA 5 3. LISTADO DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	354
TABLA 5 4. CALIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN. FUENTE: UNIDAD ADMINISTRATIVA DE CATASTRO DISTRITAL MARZO 2007.....	375
TABLA 5 5. CLASIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN.....	375
TABLA 5 6. USO DE LA CONSTRUCCIÓN.....	376
TABLA 5 7. REDES VITALES.....	377
TABLA 5 8. FACTOR C PARA ZONAS DE BOSQUE.....	382
TABLA 5 9. FACTOR C PARA ZONAS DE PASTO, TIERRAS AGRÍCOLAS O INACTIVAS. FUENTE: GRAY, D.H., LEISER, A. T. 1982. BIOTECHNICAL SLOPE PROTECTION AND EROSION CONTROL. VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY.....	384
TABLA 5 10. PERIODOS DE RETORNO Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LAS LLUVIAS DE ANÁLISIS PARA UN PERIODO DE DISEÑO DE 50 AÑOS.....	389
TABLA 5 11. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN POR GEOLOGÍA (TOMADO DE PERGALANI ET AL., 1999) ...	392
TABLA 5 12. ESCENARIOS DE SISMO CON SU RESPECTIVA ACELERACIÓN Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA EN 50 AÑOS.....	395
TABLA 5 13. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS ESCENARIOS DE LLUVIA Y SISMO.....	396
TABLA 5 15. CRITERIOS DE AMENAZA.....	397

TABLA 5 14. PERIODOS ESTRUCTURALES APROXIMADOS (DONDE TA: PERIODO APROXIMADO EN SEGUNDOS; H: ALTURA EN METROS; N: NÚMERO DE PISOS).....	400
TABLA 5 15. ECUACIONES DE LAS CURVAS DE DAÑO PARA H=2.60 M. (DONDE N: NÚMERO DE PISOS; H: ALTURA DE ENTREPISO. FM: DESPLAZAMIENTO DE FISURACIÓN PARA MAMPOSTERÍA; Yc: DESPLAZAMIENTO DE FISURACIÓN PARA PÓRTICOS, FP: DESPLAZAMIENTO DE FISURACIÓN PARA SISTEMAS PREFABRICADOS; Uc: DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO PARA SISTEMAS PREFABRICADOS).....	401
TABLA 5 16. TIPOS DE DAÑO PARA EDIFICACIONES EN MAMPOSTERÍA. (DONDE DESP: DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL. DU DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO PARA LA ESTRUCTURA. DF: DESPLAZAMIENTO DE FISURACIÓN PARA LA ESTRUCTURA. DSf : MEDIA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE FISURACIÓN. DSu: MEDIA DESVIACIÓN ESTÁNDAR ÚLTIMA).	404
TABLA 5 17. RELACIÓN DE LIDERES COMUNITARIOS.....	411
TABLA 5 18. INDICADORES PROPUESTOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SOCIAL.....	418
TABLA 5 19. CRITERIOS ADOPTADOS PARA EL ANÁLISIS DE INDICADORES.....	424
TABLA 5 20. VALORES DE PESO DE FACTORES E INDICADORES.....	426
TABLA 5 21. ÍNDICE DE VALORACIÓN INMOBILIARIA URBANA Y RURAL PARA LA VIGENCIA FISCAL 2007. FUENTE: SECRETARIA DE HACIENDA DE BOGOTÁ	428
TABLA 6 1. INVENTARIO HISTÓRICO PRM LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL [FUENTE SIRE]	534
TABLA 6 2. MUESTRA DEL INVENTARIO HISTÓRICO (1997-2007) PRM LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL [FUENTE SIRE].....	535
TABLA 6 3. LOCALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS SÍSMICAS	553
TABLA 6 4. LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DONDE SE EFECTUARON TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS.	553
TABLA 6 5. PARÁMETROS ESTIAMDOS PARA LAS UNIDADES DE SUELO RESIDUAL Y ROCA.....	560
TABLA 6 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE DONDE FUE TOMADA LA INFORMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA LAS UNIDADES DE SUELO RESIDUAL Y ROCA	561
TABLA 6 7. FACTOR DE INDICE OPTIMO.....	572
TABLA 6 8. GENERALIDADES DE TIPO DE VEGETACIÓN.....	576
TABLA 6 9. DISTRIBUCIÓN FOTOGRAFÍAS AÉREAS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL	622
TABLA 6 10. OBSERVACIONES ANÁLISIS MULTITEMPORAL COBERTUR.....	627
TABLA 7 1. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS.	639
TABLA 7 2. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.....	640

TABLA 7 3. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.....	641
TABLA 7 4. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS.....	642
TABLA 7 5. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 70 AÑOS.....	643
TABLA 7 6. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 90 AÑOS.....	644
TABLA 7 7. CÁLCULO DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	645
TABLA 7 8. FACTORES DE ERODABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES DE SUELO	647
TABLA 7 9. FACTOR C PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES DE COBERTURA.....	649
TABLA 7 10. LONGITUDES AFERENTES A LAS SECCIONES DE ANÁLISIS.....	654
TABLA 7 11. PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EN LOS DIFERENTES SITIOS DE INTERÉS.	655
TABLA 7 12. SECCION K1+517.....	656
TABLA 7 13. SECCION K3+057.....	657
TABLA 7 14. SECCION K6+037.....	657
TABLA 7 15. SECCION K8+401.....	658
TABLA 7 16. PROFUNDIDADES PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y DIFERENTES SECCIONES.....	658
TABLA 7 17. VOLÚMENES DE SEDIMENTOS POR INESTABILIDAD DE LAS MARGENES DEL RÍO.....	659
TABLA 7 18. VOLÚMENES TOTALES POTENCIALMENTE INESTABLES, CONDICIÓN DINAMICA (M3)	659
TABLA 7 19. RESULTADO DE LOS VOLÚMENES DE ENTREGA DE SEDIMENTOS PARA LA COMBINACIÓN DEL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS PAR LLUVIA Y 1000 AÑOS PARA SISMO.	663
TABLA 7 20. PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN CONSOLIDADOS POR SUBCUENCAS, PARA TORMENTAS CON DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO	665
TABLA 7 21. PARÁMETROS FISOGRÁFICOS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO SAN CRISTÓBAL	668
TABLA 7 22. CÁLCULO DE LA PENDIENTE POR EL MÉTODO DE TAYLOR	669
TABLA 7 23. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN EN LA CUENCA.....	670
TABLA 7 24. FRECUENCIAS DE DATOS DE LLUVIA ESTACIONES EL DELIRIO Y VITELMA.....	677
TABLA 7 25. PESOS ASIGNADOS A CADA ESTACIÓN DE ACUERDO AL ÁREA DE LA SUBCUENCA.....	683
TABLA 7 26. PRECIPITACIÓN ASOCIADA A PERÍODOS DE RETORNO.....	684
TABLA 7 27. CAUDALES ASOCIADA A PERÍODOS DE RETORNO.....	687
TABLA 7 28. ANÁLISIS DE FRECUENCIAS PARA LOS DATOS DE CAUDALES	689
TABLA 7 29. INFORMACIÓN DE LAS SUBCUENCAS.....	696

TABLA 7 30. NÚMERO DE CURVA PARA CADA COBERTURA VEGETAL Y USO EN LA CUENCA.....	697
TABLA 7 31. GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO PARA CADA FORMACIÓN GEOLÓGICA.....	697
TABLA 7 32. NÚMERO DE CURVA PARA CADA SUBCUENCA.....	700
TABLA 7 33. DATOS DE EVENTOS MÁXIMOS DE LLUVIA Y CAUDAL	704
TABLA 7 34. DATOS DE TORMENTA PARA EL EVENTO DEL 28 DE ABRIL DE 1982	708
TABLA 7 35. DATOS DE TORMENTA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO (DURACIÓN 6 HORAS)	710
TABLA 7 36. DATOS DE TORMENTA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO (DURACIÓN 2 HORAS)	711
TABLA 7 37. RANGOS DE DURACIONES DE TORMENTAS EN LA ESTACIÓN EL DELIRIO.....	711
TABLA 7 38. DATOS CURVAS IDF.....	715
TABLA 7 39. RESULTADOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN	718
TABLA 7 40. COMPARACIÓN ENTRE PARÁMETROS INICIALES Y PARÁMETROS CALIBRADOS	720
TABLA 7 41. NÚMEROS DE CURVA PARA DIFERENTES CONDICIONES DE LLUVIA ANTECEDENTE	723
TABLA 7 42. RESULTADOS DE LAS GRANULOMETRÍAS DEL LECHO	746
TABLA 7 43. DATOS TOMADOS POR O'BRIEN ET. AL. (1988).....	762
TABLA 7 44. VOLÚMENES CALCULADOS POR EROSIÓN EN LA CUENCA	776
TABLA 7 45. VOLÚMENES PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO PARA EL ESCENARIO III.....	784
TABLA 7 46. VOLÚMENES PRODUCIDOS POR DESLIZAMIENTOS	791
TABLA 7 47. CARACTERÍSTICAS DE LOS CANALES EN LAS QUEBRADAS EL TRIANGULO Y LA PÍCHOSA.....	798
TABLA 8 1. DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS POR TIPO ESTRUCTURAL.....	817
TABLA 8 2. CONDICIONES DE PRESIÓN PARA DIFERENTES ALTURAS DE LAMINA DE AGUA	824
TABLA 8 3. PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS EN MAMPOSTERÍA DE DOS PISOS.	826
TABLA 8 4. CLASIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN, EN VIRTUD DEL PUNTAJE OBTENIDO	829
TABLA 8 5. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL PRIMER RANGO.	833
TABLA 8 6. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL SEGUNDO RANGO.	833
TABLA 8 7. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL TERCER RANGO.....	834
TABLA 8 8. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL CUARTO RANGO.	834
TABLA 8 9. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL QUINTO RANGO.	835
TABLA 8 10. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL PRIMER RANGO.	837
TABLA 8 11. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL SEGUNDO RANGO.	837
TABLA 8 12. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL TERCER RANGO.....	838
TABLA 8 13. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL CURTO RANGO.	838
TABLA 8 14. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO PARA EL QUINTO RANGO.	839
TABLA 8 15. ÁREA DE CADA UNA DE LAS UNIDADES IDENTIFICADAS.....	841

TABLA 8 16. PRECIOS DE OFERTA Y AVALUOS.	843
TABLA 8 17. ÁREA DE CADA UNA DE LAS UNIDADES IDENTIFICADAS.	844
TABLA 8 18. FUENTE: SECRETARIA DE HACIENDA DISTRITAL: DECRETO DISTRITAL 609 DE 29 DE DICIEMBRE DE 2006. POR EL CUAL SE DETERMINA PARA EL AÑO GRAVABLE 2007 LA BASE MÍNIMA DEL IMPUESTO PREDIAL UNIFICADO DE LOS PREDIOS A LOS CUALES NO SE LES HA FIJADO AVALÚO CATASTRAL.	845
TABLA 8 19. IDENTIFICADORES, SEGÚN CCB.	847
TABLA 8 20. COSTO DE PÉRDIDAS EN EL SECTOR COMERCIAL, EN PESOS COLOMBIANOS.	849
TABLA 8 21. NÚMERO ESPERADO PERSONAS AFECTADAS PARA LOS DIFERENTES PARÁMETROS DE ANÁLISIS.	861
TABLA 9 1. DATOS ESTACIONES DPAE.	903
TABLA 9 2. PROBABILIDADES.	907
TABLA 9 3. VALORES MÍNIMOS DE LLUVIAS ANTECEDENTES Y LLUVIAS DE EVENTO PARA INDUCIR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA.	911
TABLA 9 4. VALORES ADOPTADOS PARA LOS PARÁMETROS DE HUMEDAD Y SUCCIÓN EN EL FRENTE HÚMEDO PARA LAS DIFERENTES UNIDADES SUPERFICIALES.	911
TABLA 9 5. CRITERIOS SUGERIDOS PARA DIFERENTES NIVELES DE ALERTA.	914
TABLA 9 6. SECUENCIA DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES RECOMENDADO PARA LA DIFUSIÓN DE LAS ALERTAS.	916
TABLA 9 7. CONVENCIONES DE LOS MAPAS DE AMENAZA Y RIESGO.	918

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 2 1. LOCALIZACIÓN DE LOS CONCEPTOS TÉCNICOS REPORTADOS EN EL SIRE DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO. LOS NÚMEROS CORRESPONDEN AL CONSECUTIVO DADO POR LA DPAE Y SON LOS MISMOS QUE APARECEN EN LA TABLA 2 1.....	66
FIGURA 2 2. UNIDADES DE SUELO. FUENTE: CAR (2004).	80
FIGURA 2 3. UNIDADES DE SUELO. FUENTE: CAR (2006).	83
FIGURA 2 4. COBERTURA DEL SUELO. FUENTE: CAR (2004).	85
FIGURA 2 5. PRECIPITACIÓN ANUAL DURANTE LOS ÚLTIMOS 140 AÑOS.	89
FIGURA 2 6. EXPLORACIÓN DE DOMINIO DE TIEMPO ELECTROMAGNÉTICO.	93
FIGURA 2 7. PUNTOS DE MUESTREO TEM Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL SUR DE LOS CERROS ORIENTALES (CERCA DE USME)	93
FIGURA 2 8. RESULTADOS TEM PARA EL PUNTO No. 6, UBICADO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL.....	94
FIGURA 3 1. CURVAS DE FLUJO PARA UN LÍQUIDO IDEALIZADO Y CUERPOS REOLÓGICOS PLÁSTICOS, CON LOS NOMBRES DE LOS MODELOS DE FLUJO INDICADOS. LOS LÍQUIDOS NO EXHIBEN RESISTENCIA AL CORTE. LOS CUERPOS PLÁSTICOS COMIENZAN A DEFORMARSE SOLO DESPUÉS DE QUE UN ESFUERZO DE CEDENCIA, S, ES ALCANZADO (PIERSON Y COSTA, 1987).	145
FIGURA 3 2. CLASIFICACIÓN REOLÓGICA DE FLUJOS DE SEDIMENTOS – AGUA. LAS FRONTERAS VERTICALES A, B, Y C SON UMBRALES REOLÓGICOS Y SON FUNCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA Y DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS (PIERSON Y COSTA, 1987).....	148
FIGURA 3 3. RESISTENCIA A LA CEDENCIA DE VARIAS MEZCLAS DE SEDIMENTOS – AGUA (TAMAÑO PROMEDIO DE GRANOS INDICADO) GRAFICADO CONTRA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS (PIERSON Y SCOTT, 1985), LA INTERSECCIÓN DE CADA CURVA CON LAS ABSCISAS MARCA LA TRANSICIÓN DE FLUJO NORMAL A FLUJO HIPERCONCENTRADO (FRONTERA A DE LA FIGURA 3 2). EL INCREMENTO ABRUPTO DE LA PENDIENTE EN CADA CURVA, MARCA APROXIMADAMENTE LA TRANSICIÓN DE FLUJO HIPERCONCENTRADO A FLUJO BARROSO (FRONTERA B DE LA FIGURA 3 2).....	149
FIGURA 3 4. NOMENCLATURA APROPIADA PARA LA CLASIFICACIÓN REOLÓGICA PROPUESTA EN LA FIG.3 (PIERSON Y COSTA, 1987).....	150

FIGURA 3 5. CLASIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA SOBRE TALUDES COMO UNA FUNCIÓN DE LA FRACCIÓN SÓLIDA Y EL TIPO DE MATERIAL (COUSSOT Y MEUNIER, 1996).....	151
FIGURA 3 6. ESQUEMA CONCEPTUAL DE LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA EL MANEJO DEL RIESGO.....	158
FIGURA 3 7. PIRÁMIDE DE DATOS.....	170
FIGURA 3 8. CRITERIOS DE RIESGO ACEPTABLE.....	174
FIGURA 3 9. CRITERIOS DE RIESGO ACEPTABLE PARA PÉRDIDAS ECONÓMICAS.....	175
FIGURA 3 10. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROYECTO.....	178
FIGURA 4 1. REPRESENTACIÓN GEOLÓGICA.....	189
FIGURA 4 2. TRAMAS MÁS COMUNES UTILIZADAS EN LA REPRESENTACIÓN GEOLÓGICA.....	190
FIGURA 4 4. DIRECCIÓN DE UN PLANO Y SU NOTACIÓN EN MAPAS GEOLÓGICOS.....	192
FIGURA 4 5. BUZAMIENTO DE UN PLANO.....	193
FIGURA 4 6. DETERMINACIÓN DEL SENTIDO DE BUZAMIENTO DE UN PLANO.....	193
FIGURA 4 7. REPRESENTACIÓN DE UN CONTACTO CONCORDANTE.....	195
FIGURA 4 8. REPRESENTACIÓN DE UN CONTACTO DISCORDANTE.....	195
FIGURA 4 9. ESQUEMAS DE LA POSICIÓN DE LA BASE Y EL TECHO DE UN ESTRATO EN CONDICIÓN NORMAL E INVERTIDA.....	197
FIGURA 4 10. REPRESENTACIÓN DEL BUZAMIENTO DE UN ESTRATO NORMAL.....	197
FIGURA 4 11. REPRESENTACIÓN DEL BUZAMIENTO DE UN ESTRATO INVERTIDO.....	198
FIGURA 4 12. REPRESENTACIÓN DEL BUZAMIENTO DE LA FOLIACIÓN EN ROCAS METAMÓRFICAS.....	198
FIGURA 4 13. ESQUEMA DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE UN PLIEGUE.....	199
FIGURA 4 14. REPRESENTACIÓN DE PLIEGUES EN MAPAS GEOLÓGICOS.....	200
FIGURA 4 15. REPRESENTACIÓN DE PLIEGUES CON FLANCOS INVERTIDOS.....	200
FIGURA 4 16. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA FALLA GEOLÓGICA.....	201
FIGURA 4 17. REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FALLA.....	202
FIGURA 4 18. REPRESENTACIÓN DE AFLORAMIENTOS DE ESTRATOS DE ROCA DEL MISMO ESPESOR PERO EN TOPOGRAFÍA DIFERENTE.....	203
FIGURA 4 19. ESQUEMA DE REPRESENTACIÓN DE ESTRATOS DE ROCA CON IGUAL TOPOGRAFÍA Y ESPESOR PERO DIFERENTE BUZAMIENTO.....	203
FIGURA 4 20. VARIACIONES EN LA SUPERFICIE DE AFLORAMIENTO DE UNA CAPA CON DIFERENTES VALORES DE BUZAMIENTO EN UNA ZONA DE TOPOGRAFÍA PLANA.....	204
FIGURA 4 21. VARIACIÓN EN LA SUPERFICIE DE AFLORAMIENTO DE UNA CAPA CON EL MISMO VALOR DE BUZAMIENTO PERO EN DIFERENTES SUPERFICIES TOPOGRÁFICAS.....	204
FIGURA 4 22. CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LA CUENCA.....	218

FIGURA 4 23. CURVAS ADIMENSIONALES DEL SCS.	223
FIGURA 4 24. MÉTODO DE ABSTRACCIONES DEL SCS.....	224
FIGURA 4 25. HIDROGRÁMA UNITARIO DEL SCS.	228
FIGURA 4 26. BOSQUE DENSO HÚMEDO SIEMPRE VERDE.....	235
FIGURA 4 27. BOSQUE DENSO HÚMEDO SIEMPRE VERDE O DECIDUO.	236
FIGURA 4 28. MATA DE MONTAÑA.	236
FIGURA 4 29. BOSQUE ABIERTO.....	237
FIGURA 4 30. SABANA LEÑOSA.....	237
FIGURA 4 31. SABANA ARBÓREA.	238
FIGURA 4 32. SABANA ARBUSTIVA.	238
FIGURA 4 33. CURVAS TÍPICAS DE REFLEXIÓN QUE CONSTITUYEN LA COBERTURA TERRESTRE.	244
FIGURA 4 34. VALORES DE BRILLO DE SALIDA.	245
FIGURA 4 35. HISTOGRAMA DE VARIACIÓN.	245
FIGURA 4 36. PROCESO PARA EL AJUSTE DE HISTOGRAMAS.	246
FIGURA 4 37. TRANSFORMACIÓN DE RGB A IHS (RGB – IHS).	247
FIGURA 4 38. SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL.....	249
FIGURA 4 39. EQUIPO DE GEOELÉCTRICA PARA LA TOMA DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES Y TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	250
FIGURA 4 40. ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS PARA TOMOGRAFÍA.	251
FIGURA 4 41. ARREGLO DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN.	252
FIGURA 4 42. NOMOGRAMA DE WESCHMEIER.....	259
FIGURA 4 43. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL PLANTEAMIENTO GENERAL DE LAS ECUACIONES.	265
FIGURA 4 44. VOLUMEN DE CONTROL PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE AGUA ACUMULADO DENTRO DEL SUELO.	268
FIGURA 4 45. FUERZAS PSEUDOESTÁTICAS ACTUANDO EN MASAS CON DIFERENTES GEOMETRÍAS....	272
FIGURA 4 46. ANALOGÍA ENTRE (A) DESLIZAMIENTO DE UN TALUD Y (B) BLOQUE SOBRE UN PLANO INCLINADO. TOMADO DE KRAMER (1996).	274
FIGURA 4 47. FUERZAS ACTUANTES EN UN BLOQUE SOBRE UN PLANO INCLINADO. A. CONDICIÓN ESTÁTICA, B. CONDICIÓN DINÁMICA. TOMADO DE KRAMER (1996).....	275
FIGURA 4 48. VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD PSEUDOESTÁTICO CON EL COEFICIENTE DE ACELERACIÓN HORIZONTAL K_h . BLOQUE SOBRE UN PLANO INCLINADO A 20° PARA $\Phi = 20^\circ$, EL BLOQUE SE ENCUENTRA EN EL PUNTO DE FALLA ($FS=1$) BAJO CONDICIONES ESTÁTICAS, ASÍ QUE EL COEFICIENTE DE ACELERACIÓN CRÍTICA K_c ES CERO. PARA $\Phi = 30^\circ$ Y $\Phi = 40^\circ$ LOS VALORES DE K_c SON 0.17 Y 0.36 RESPECTIVAMENTE. TOMADO DE KRAMER (1996).	276

FIGURA 4 49. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD Y EL DESPLAZAMIENTO RELATIVOS ENTRE EL BLOQUE Y EL PLANO INCLINADO, DEBIDO A UN PULSO DE ACELERACIÓN QUE EXCEDE LA ACELERACIÓN CRÍTICA ENTRE $T = t_0$ Y $T = t_0 + \Delta t$. TOMADO DE KRAMER (1996).....	277
FIGURA 4 50. DESARROLLO DEL DESPLAZAMIENTO PERMANENTE DE UN TALUD PARA UN EVENTO SÍSMICO REAL. TOMADO DE (WILSON Y KEEFER, 1985).....	281
FIGURA 4 51. CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZA SEGÚN HANSEN (1984).....	307
FIGURA 4 52. CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZA DE DESLIZAMIENTO SEGÚN ESCALA DE APLICACIÓN, INFORMACIÓN DISPONIBLE Y TÉCNICA USADA.	308
FIGURA 4 53. EJEMPLOS DE LAS CURVAS PROFUNDIDAD VS. DAÑO. (TOMADO DE KELMAN).	317
FIGURA 4 54. FUNCIÓN DE PRESIÓN PARA LA ACCIÓN DE ONDAS DE IMPACTO (TOMADO DE USACE, 1984).....	323
FIGURA 4 55. MARCO CONCEPTUAL PARA IDENTIFICAR EL RIESGO.....	327
FIGURA 5 1. NATURALEZA INFORMACIÓN CAPTURADA.....	343
FIGURA 5 2. LAS CURVAS DE COLOR AZUL REPRESENTAN LAS DEL MIN. AMBIENTE MIENTRAS QUE LAS DE COLOR MAGENTA REPRESENTAN LAS DIGITALIZADAS DEL IGAC.....	344
FIGURA 5 3. EQUIPO DE MEDICIÓN DE CAUDALES.....	357
FIGURA 5 4. INSTALACIÓN DEL EQUIPO IDF.....	359
FIGURA 5 5. PUNTOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES.....	359
FIGURA 5 6. ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN EL HEC-RAS.....	365
FIGURA 5 7. FACTOR DE EROSIVIDAD R. TOMADO DE "SANEAMIENTO AMBIENTAL Y CONTROL DE CRECIENTES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO".....	379
FIGURA 5 8. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE LA SUBCUENCA. FUENTE: DIAZ-GRANADOS, M.A., ORDOÑEZ, J.I., DEEB, A.M., EN "DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS EXTENSAS", MEMORIAS XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, IAHR, SAO PAULO, BRASIL, AGOSTO, 1986.....	387
FIGURA 5 9. SELECCIONAR EL PERFIL MAS DESFAVORABLE DE YI P YJ.....	392
FIGURA 5 10. ESQUEMA UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CRESTA O ARISTA.	393
FIGURA 5 11. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN DEBIDO A TOPOGRAFÍA.	
54	
FIGURA 5 12. MUESTRA EL CASO PARA EL CÁLCULO DE LA PENDIENTE PONDERADA.....	394
FIGURA 5 13. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE BORDES DE CRESTAS.....	394
FIGURA 5 14. FUNCIÓN DE PRESIÓN PARA LA ACCIÓN DE ONDAS DE IMPACTO (TOMADO DE USACE, 1984).....	399

FIGURA 5 15. CURVAS DE DAÑO.....	401
FIGURA 5 16. MODO DE VIBRACIÓN.....	402
FIGURA 5 17. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA	406
FIGURA 5 18. INTERVALOS DE DAÑO.....	407
FIGURA 6 1. LINEAMIENTOS FOTOGEOLÓGICOS QUE DIVIDEN LAS REGIONES ESTRUCTURALES.	496
FIGURA 6 2. ESTEREOGRÁMA QUE RESUME EL SISTEMA ESTRUCTURAL PARA EL BLOQUE COLGANTE DE LA FALLA DE BOGOTÁ EN EL ÁREA DE SAN CRISTÓBAL (TANQUES DEL ACUEDUCTO).	499
FIGURA 6 3. ASPECTOS GEOLÓGICOS (CAMBIO DE DOMINIO ESTRUCTURAL DE CAPAS, DE SUBHORIZONTALES A SUBVERTICALES) Y GEOMORFOLÓGICOS (GANCHOS DE FLEXIÓN, MARCADOS EN LÍNEAS AMARILLAS) QUE PERMITEN DEDUCIR FALLAMIENTO.	500
FIGURA 6 4. SOLUCIONES DE PLANOS DE FALLA PARA LAS FALLAS MESOSCÓPICAS REGISTRADAS EN EL SECTOR DEL ACCESO A SAN ISIDRO	501
FIGURA 6 5. SOLUCIONES DE PLANOS DE FALLA PARA LAS FALLAS MESOSCÓPICAS REGISTRADAS EN LA ZONA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL.	502
FIGURA 6 6. SOLUCIÓN TEÓRICA DE PLANOS DE MOVIMIENTO, PARA LAS FALLAS MACROSCÓPICAS, REPRESENTADO EL SISTEMA SINISTRAL PARA LA FALLA DE SAN CRISTÓBAL; BASADO EN LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICA DE LOS ELEMENTOS REGISTRADOS A ESCALA DE AFLORAMIENTO....	503
FIGURA 6 7. SOLUCIONES DE PLANOS DE FALLA PARA LAS FALLAS MESOSCÓPICAS REGISTRADAS EN EL TRAYECTO ENTRE LOS CERROS DE ZUQUE Y LA VIGA.....	504
FIGURA 6 8. SOLUCIÓN TEÓRICA DE PLANOS DE MOVIMIENTO, PARA LAS FALLAS MACROSCÓPICAS, REPRESENTADO EL SISTEMA DEXTRAL DE LA FALLA DE LA OSA; BASADO EN LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICA DE LOS ELEMENTOS REGISTRADOS A ESCALA DE AFLORAMIENTO.	505
FIGURA 6 9. DOMINIOS GEOMORFOLÓGICOS ESBOZADOS SOBRE FOTOGRAFÍA AÉREA. NÓTENSE LAS FORMAS ABRUPTAS DE LA CORDILLERA, MARCADAS POR EL AFLORAMIENTO DE ROCAS RESISTENTES, EN COMPARACIÓN CON LAS FORMAS MENOS EVIDENTES DEL PIEDEMONTE (AUNQUE LA URBANIZACIÓN MIMETIZA DICHAS FORMAS).....	509
FIGURA 6 10. DOMINIO DE PIEDEMONTE, CON ABANICOS ALUVIALES Y FORMAS PREDOMINANTEMENTE DENUDACIONALES SOBRE MATERIALES ARCILLOSOS.	516
FIGURA 6 11. DESLIZAMIENTO COMPLEJO CON IMPORTANTE COMPONENTE ROTACIONAL, UBICADO EN LAS CABECERAS DE LA QUEBRADA LA OSA.	527
FIGURA 6 12. EXPLORACIÓN GEOTECNICA.....	552
FIGURA 6 13. IMAGEN SPOT 4.....	563
FIGURA 6 14. HISTOGRAMA DE LA BANDA 1 SIN APLICAR.	564

FIGURA 6 15. IMAGEN DE LA BANDA SIN APLICAR REALCE.	564
FIGURA 6 16. HISTOGRAMA DE LA BANDA 2 SIN APLICAR.	565
FIGURA 6 17. IMAGEN DE LA BANDA SIN APLICAR REALCE	565
FIGURA 6 18. HISTOGRAMA DE LA BANDA 3 SIN APLICAR.	566
FIGURA 6 19. IMAGEN DE LA BANDA SIN APLICAR REALCE	566
FIGURA 6 20. HISTOGRAMA DE LA BANDA 4 SIN APLICAR.	567
FIGURA 6 21. IMAGEN DE LA BANDA SIN APLICAR REALCE	567
FIGURA 6 22. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN PARA TODAS LAS BANDAS	571
FIGURA 6 23. PERFIL ESPECTRAL	573
FIGURA 6 24. DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS ESPECTRALES PARA LA VEGETACIÓN	
FIGURA 6 25. HISTOGRAMA PARA LA EVALUACIÓN DE HISTOGRAMA EN LA BANDA 3	577
FIGURA 6 26. REALCE DE CONTRASTE – IGUALACIÓN DE HISTOGRAMA.....	578
FIGURA 6 27. HISTOGRAMA PARA LA IGUALACIÓN GAMMA EN LA BANDA 3.....	579
FIGURA 6 28. REALCE DE CONTRASTE - GAMMA	579
FIGURA 6 29. IMAGEN CON FILTRO	581
FIGURA 6 30. HISTOGRAMA PARA LA EVALUACIÓN DE HISTOGRAMA EN LA BANDA 3	582
FIGURA 6 31. IMAGEN CON ÍNDICE DE VEGETACIÓN TASSELED CAP	584
FIGURA 6 32. IMAGEN CON TRANSFORMACIÓN.....	585
FIGURA 6 33. IMAGEN A CLASIFICAR.....	588
FIGURA 6 34. IMAGEN CON POLÍGONOS DE FIRMA	589
FIGURA 6 35. IMAGEN CLASIFICADA	591
FIGURA 6 36. IMAGEN CLASIFICADA – REMUESTREADA, HOMOGENEIZADA.	592
FIGURA 6 37. IMAGEN SUAVIZADA	593
FIGURA 7 1. VARIACIÓN DEL FACTOR DE EROSIDIDAD DE LA LLUVIA EN FUNCIÓN DE LOS PERIODOS DE RETORNO	646
FIGURA 7 2. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DEL FACTOR LS PARA TODA LA CUENCA	648
FIGURA 7 3. GRÁFICA CREADA A PARTIR DE LOS DATOS RECOPIADOS EN EL ESTUDIO“SANEAMIENTO AMBIENTAL Y CONTROL DE CRECIENTES EN LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO”	651
FIGURA 7 4. LONGITUDES AFERENTES A LAS SECCIONES.....	653
FIGURA 7 5. DIVISIÓN EN SUBCUENCAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	667
FIGURA 7 6. PERFIL LONGITUDINAL	669
FIGURA 7 7. ORDEN DE LOS CAUCES SEGÚN STRAHLER.....	671
FIGURA 7 8. CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA.....	672
FIGURA 7 9. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL	674

FIGURA 7 10. PRECIPITACIÓN DIARIA ESTACIÓN EL DELIRIO	675
FIGURA 7 11. PRECIPITACIÓN DIARIA ESTACIÓN VITELMA	676
FIGURA 7 12. FRECUENCIAS DE DATOS DE LLUVIA ESTACIÓN EL DELIRIO	676
FIGURA 7 13. FRECUENCIAS DE DATOS DE LLUVIA ESTACIÓN VITELMA	677
FIGURA 7 14. ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL.....	679
FIGURA 7 15. PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL	680
FIGURA 7 16. POLÍGONOS DE THIESSEN.....	682
FIGURA 7 17. PROMEDIO DE CAUDALES MENSUALES MULTIANUALES (1990-2001)	685
FIGURA 7 18. PROMEDIO DE CAUDALES Y PROMEDIOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL	686
FIGURA 7 19. VALORES MÁXIMOS DE CAUDALES EN LA ESTACIÓN EL DELIRIO.....	686
FIGURA 7 20. FUNCIÓN ACUMULADA DE PROBABILIDAD.....	688
FIGURA 7 21. FRECUENCIAS PARA LOS DATOS DE CAUDAL EN LA ESTACIÓN EL DELIRIO.....	689
FIGURA 7 22. DATOS DE LLUVIAS Y CAUDALES ESTACIÓN PALO BLANCO (1982)	691
FIGURA 7 23. DATOS DE LLUVIAS Y CAUDALES ESTACIÓN EL DELIRIO (1982).....	692
FIGURA 7 24. DATOS DE LLUVIAS Y CAUDALES ESTACIÓN VITELMA (1982).....	693
FIGURA 7 25. INFORMACIÓN DE COBERTURA Y USOS DEL SUELO (UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2007).....	698
FIGURA 7 26. LEYENDA DEL MAPA GEOLÓGICO (UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2007)	699
FIGURA 7 27. NÚMEROS DE CURVA ESTIMADOS EN LA CUENCA.....	701
FIGURA 7 28. LECTURA DE NIVELES – ABRIL 28 Y 29 DE 1982	705
FIGURA 7 29. HIDROGRAMA DE ESCORRENTÍA DIRECTA – ABRIL 28 Y 29 DE 1982	706
FIGURA 7 30. TORMENTA – ABRIL 28 DE 1982.....	707
FIGURA 7 31. TORMENTA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (EVENTO DEL 4 DE DICIEMBRE DE 1966).....	709
FIGURA 7 32. TORMENTA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO (EVENTO DEL 11 DE ABRIL DE 1963).....	711
FIGURA 7 33. CURVAS INTENSIDAD– DURACIÓN FRECUENCIA (IDF). FUENTE: EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, INGETEC S.A., 2006.....	713
FIGURA 7 34. ESQUEMA DE SUBCUENCAS EN EL HEC-HMS	717
FIGURA 7 35. COMPARACIÓN ENTRE EL HIDROGRAMA SIMULADO Y EL OBSERVADO	718
FIGURA 7 36. CONVERGENCIA DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	719
FIGURA 7 37. HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN EFECTIVA PARA EL EVENTO DE CALIBRACIÓN.....	721
FIGURA 7 38. HIDROGRAMAS OBTENIDOS EN LAS SUBCUENCAS PARA EL EVENTO DE CALIBRACIÓN	722
FIGURA 7 39. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA Tr=3 AÑOS (PARTE 1).....	724
FIGURA 7 40. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA Tr=3 AÑOS (PARTE 2).....	725

FIGURA 7 41. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=5$ AÑOS (PARTE 1).....	726
FIGURA 7 42. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=5$ AÑOS (PARTE 2).....	727
FIGURA 7 43. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=10$ AÑOS (PARTE 1).....	728
FIGURA 7 44. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=10$ AÑOS (PARTE 2).....	729
FIGURA 7 45. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=25$ AÑOS (PARTE 1).....	730
FIGURA 7 46. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=25$ AÑOS (PARTE 2).....	731
FIGURA 7 47. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=50$ AÑOS (PARTE 1).....	732
FIGURA 7 48. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=50$ AÑOS (PARTE 2).....	733
FIGURA 7 49. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=100$ AÑOS (PARTE 1).....	734
FIGURA 7 50. HIDROGRAMAS DE CAUDAL PARA $Tr=100$ AÑOS (PARTE 2).....	735
FIGURA 7 51. RESULTADOS DE LOS AFOROS DE CAUDAL LIQUIDO [LITROS/SEG] (PARTE 1)	736
FIGURA 7 52. RESULTADOS DE LOS AFOROS DE CAUDAL LIQUIDO [LITROS/SEG] (PARTE 2)	737
FIGURA 7 53. RESULTADOS DE LOS AFOROS DE CAUDAL LIQUIDO [LITROS/SEG] (PARTE 3)	738
FIGURA 7 54. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO PARA ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS	743
FIGURA 7 55. PUNTOS DE TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS.....	744
FIGURA 7 56. HIDROMETRÍAS DEL LECHO EN EL RÍO SAN CRISTÓBAL Y EN ALGUNOS DE SUS AFLUENTES.....	744
FIGURA 7 57. GRANULOMETRÍAS DEL LECHO EN EL RÍO SAN CRISTÓBAL Y EN ALGUNOS DE SUS AFLUENTES.....	745
FIGURA 7 58. ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN EL HEC-RAS	747
FIGURA 7 59. SECCIONES TRANSVERSALES EN LOS PUENTES	748
FIGURA 7 60. VARIACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE A LO LARGO DEL CANAL.....	750
FIGURA 7 61. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD PROMEDIO A LO LARGO DEL CANAL.....	751
FIGURA 7 62.. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE DE LA CARRERA 8ª.....	753
FIGURA 7 63.. PERFIL LONGITUDINAL PUENTES CARRERA 8ª Y CARRERA 6ª.....	754
FIGURA 7 64. CURVA NIVEL Vs. CAUDAL PUENTE CARRERA 8ª.....	754
FIGURA 7 65. CURVA NIVEL Vs. CAUDAL PUENTE CARRERA 6ª.....	754
FIGURA 7 66. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE DE LA CARRERA 6ª.....	755
FIGURA 7 67. CURVA NIVEL Vs. CAUDAL PUENTE CARRERA 1ª ESTE.....	756
FIGURA 7 68. PERFIL LONGITUDINAL PUENTE CARRERA 1ª ESTE.....	756
FIGURA 7 69. PERFIL LONGITUDINAL PUENTE CARRERA 6ª ESTE.....	757
FIGURA 7 70. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE DE LA CARRERA 6ª ESTE	757
FIGURA 7 71. CURVA NIVEL Vs. CAUDAL PUENTE CARRERA 6ª ESTE	758
FIGURA 7 72. PERFIL LONGITUDINAL PUENTE CARRERA 9ª ESTE	758
FIGURA 7 73. CURVA NIVEL Vs. CAUDAL PUENTE CARRERA 9ª ESTE.....	759

FIGURA 7 74. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE HIDROMETRÍAS	761
FIGURA 7 75. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=3 AÑOS).....	768
FIGURA 7 76. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=5 AÑOS).....	769
FIGURA 7 77. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=10 AÑOS).....	770
FIGURA 7 78. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=25 AÑOS).....	771
FIGURA 7 79. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=50 AÑOS).....	772
FIGURA 7 80. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=100 AÑOS).....	773
FIGURA 7 81. HIDROGRAMA DE CAUDAL E HIDROGRAMA DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS PARA LLUVIA, Y 1000 AÑOS PARA SISMO)	775
FIGURA 7 82. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=5 AÑOS) EMPLEANDO LOS SEDIMENTOS ESTIMADOS CON LA ECUACIÓN USLE	777
FIGURA 7 83. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=10 AÑOS) EMPLEANDO LOS SEDIMENTOS ESTIMADOS CON LA ECUACIÓN USLE	778
FIGURA 7 84. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=25 AÑOS) EMPLEANDO LOS SEDIMENTOS ESTIMADOS CON LA ECUACIÓN USLE	779
FIGURA 7 85. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=50 AÑOS) EMPLEANDO LOS SEDIMENTOS ESTIMADOS CON LA ECUACIÓN USLE	780
FIGURA 7 86. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=100 AÑOS) EMPLEANDO LOS SEDIMENTOS ESTIMADOS CON LA ECUACIÓN USLE	781
FIGURA 7 87. HIDROGRAMA DE CAUDAL E HIDROGRAMA DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS PARA LLUVIA, Y 1000 AÑOS PARA SISMO)	783
FIGURA 7 88. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=5 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO III	785
FIGURA 7 89. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=10 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO III	786
FIGURA 7 90. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=25 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO III	787
FIGURA 7 91. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=50 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO III	788
FIGURA 7 92. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=100 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO III	789
FIGURA 7 93. HIDROGRAMA DE CAUDAL E HIDROGRAMA DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS PARA LLUVIA, Y 1000 AÑOS PARA SISMO)	790
FIGURA 7 94. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=5 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO IV	792

FIGURA 7 95. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=10 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO IV	793
FIGURA 7 96. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=25 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO IV	794
FIGURA 7 97. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=50 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO IV	795
FIGURA 7 98. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D (Tr=100 AÑOS PARA LLUVIA, 1000 AÑOS PARA SISMO) PARA EL ESCENARIO IV	796
FIGURA 7 99. OBRAS PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D PARA LAS QUEBRADAS LA PICHOSA Y EL TRIANGULO (CANAL DE MITIGACIÓN)	798
FIGURA 7 100. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA CON FLO-2D PARA LAS QUEBRADAS LA PICHOSA Y EL TRIANGULO CON OBRAS	799
FIGURA 7 101. LOCALIZACIÓN DEL DIQUE PARA LA SIMULACIÓN DEL ROMPIMIENTO DE PRESA (EL DIQUE ESTA EN EL SECTOR DE AGUAS CLARAS).....	800
FIGURA 7 102. SITIO DE LOCALIZACIÓN DEL DIQUE.....	801
FIGURA 7 103. RESULTADOS DEL ROMPIMIENTO DEL DIQUE	802
FIGURA 8 1. DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS, TOMADA DE LA BASE DE DATOS DE CATASTRO DISTRITAL.	819
FIGURA 8 2. CURVA DE DERIVAS PARA ESTRUCTURAS EN MAMPOSTERÍA DE DOS PISOS.	825
FIGURA 8 3. CURVAS DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS EN MAMPOSTERÍA.	826
FIGURA 8 4. CLASIFICACIÓN PREDIAL POR VALOR METRO CUADRADO DE TERRENO.	830
FIGURA 8 5. CLASIFICACIÓN PREDIAL POR VALOR METRO CUADRADO DE CONSTRUCCIÓN	831
FIGURA 8 6. DISTRIBUCIÓN POR METRO CUADRADO	832
FIGURA 8 7. VALOR POR METRO CUADRADO	836
FIGURA 8 8. UNIDADES CARTOGRÁFICAS DEFINIDAS PARA LA VALORACIÓN RURAL	840
FIGURA 8 9. DISTRIBUCIÓN DE LOS NEGOCIOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.	848
FIGURA 8 10. DISTRIBUCIÓN DE LOS NEGOCIOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.	849
FIGURA 8 11. RIESGO ECONÓMICO ASOCIADO CON INUNDACIONES.	851
FIGURA 8 12. RIESGO ECONÓMICO ASOCIADO CON FLUJOS INCLUYENDO LOS SEDIMENTOS POR LOS DIFERENTES PROCESOS ESTUDIADOS EN LA CUENCA.	852
FIGURA 8 13. RIESGO ECONÓMICO POR INUNDACIONES PARA LOS DIFERENTES AÑOS DURANTE EL TIEMPO DE DISEÑO.	853
FIGURA 8 14. RIESGO ECONÓMICO POR INUNDACIONES PARA LOS DIFERENTES AÑOS DURANTE EL TIEMPO DE DISEÑO.	854

FIGURA 8 15. PROYECCIÓN DEL RIESGO ECONÓMICO Y DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN CONSIDERADAS PARA LA QUEBRADA LA PICHOSA.	856
FIGURA 8 16. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO PARA LA CANALIZACIÓN DE LA QUEBRADA LA PICHOSA. ...	857
FIGURA 8 17. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO PARA LAS OBRAS PROPUESTAS POR GÓMEZ CAJIAO EN LA QUEBRADA LA PICHOSA.	858
FIGURA 8 18. COMPARACIÓN DE COSTOS DE MITIGACIÓN CONTRA LAS PÉRDIDAS ESPERADAS EN LA QUEBRADA EL TRIÁNGULO.	859
FIGURA 8 19. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO PARA DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO DE LA QUEBRADA EL TRIÁNGULO.	860
FIGURA 8 20. PERSONAS POTENCIALMENTE AFECTAS POR INUNDACIONES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL.	862
FIGURA 8 21. PERSONAS POTENCIALMENTE AFECTAS POR FLUJOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL.	864
FIGURA 9 1. LA AMENAZA Y LA VULNERABILIDAD SE REDUCEN MEDIANTE MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN, RESPECTIVAMENTE.	864
FIGURA 9 2. EL MARCO TEMPORAL DE LAS GESTIONES DE RIESGO Y DESASTRE. LA PREPARACIÓN COMPRENDE EL CONJUNTO DE MEDIDAS QUE SE IMPLEMENTAN PARA MINIMIZAR LOS DAÑOS CAUSADOS POR EL EVENTO NATURAL MIENTRAS OCURRE.	865
FIGURA 9 3. COMPONENTES DEL SAT.	868
FIGURA 9 4. ESQUEMA OPERATIVO DEL SAT.	870
FIGURA 9 5. CUATRO ELEMENTOS PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA.	876
FIGURA 9 6. MEDICIÓN DE CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS.	883
FIGURA 9 7. SISTEMA DE MEDICIÓN Y ALERTA.	884
FIGURA 9 8. DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA DE ALERTA TELEMÉTRICO.	884
FIGURA 9 9. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS. SENSOR DIGITAL DE NIVELES DEL RÍO, ALARMA AUTOMÁTICA Y PLUVIÓMETRO.	885
FIGURA 9 10. SENSOR DE MEDICIÓN OPERADO POR LA COMUNIDAD.	888
FIGURA 9 11. TRANSMISIÓN DE LOS DATOS POR VOLUNTARIOS DE LA COMUNIDAD A TRAVÉS DE RADIOCOMUNICACIÓN.	889
FIGURA 9 12. RELACIÓN ENTRE LLUVIAS ANTECEDENTES PARA PERIODOS DE 3 A 15 DÍAS CONTRA LLUVIA DE EVENTO DE 3 DÍAS. LOS PUNTOS REPRESENTAN LOS CASOS DE DESLIZMAINETO REPORTADOS EN LA BASE DE DATOS DEL SIRE EN LA ZONA DE SAN CRISTÓBAL.	909

FIGURA 9 13. RELACIÓN LLUVIAS ANTECEDENTES PARA UN PERIODO DE 15 DÍAS CONTRA LLUVIA DIARIA, DE ACUERDO CON LA PROPUESTA DE ABOSHI. LOS PUNTOS REPRESENTAN DESLIZAMIENTOS EN LA BASE DE DATOS DEL SIRE PARA LA ZONA DE SAN CRISTÓBAL.	910
FIGURA 9 14. RELACIÓN ENTRE LLUVIAS ANTECEDENTES DE 25 DÍAS Y LA LLUVIA DIARIA, DE ACUERDO CON LA PROPUESTA DE TERCEN. LOS PUNTOS REPRESENTAN DESLIZAMIENTOS EN LA BASE DE DATOS DEL SIRE EN LA ZONA DE SAN CRISTÓBAL.	910
FIGURA 9 15. VALORES DE INTENSIDAD Y DURACIÓN MÍNIMA DE LLUVIAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA SATURACIÓN DEL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES.	912
FIGURA 9 16. VALORES DE LLUVIA TOTAL Y DURACIÓN REQUERIDOS PARA LA SATURACIÓN DEL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES.	913
FIGURA 9 17. DETALLE DE LOS MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA), ASOCIADOS A UNA PROFUNDIDAD DE 1.0M EN LA PARTE ALTA Y MEDIA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL.	919
FIGURA 9 18. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA) PARA LA PARTE MEDIA DEL RÍO.	920
FIGURA 9 19. MODELACIÓN EN FLO 2D DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL. PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.	921
FIGURA 9 20. MODELACIÓN EN FLO 2D DE LA MANCHA DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.	922
FIGURA 9 21. ESTADO DE COBERTURA VEGETAL PROTECTORA DE LA QUEBRADA AGUAS CLARAS. SOBRE LA CALLE 28 SUR - CARRERA 22 ESTE.	923
FIGURA 9 22. ZONA DE AFECTACIÓN POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS. EL TRAMO DEL RÍO ENTRE LA CARRERA 21B ESTE Y LA TRANSVERSAL 11 ESTE.	924
FIGURA 9 23. ZONA DE AFECTACIÓN POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. EL TRAMO DEL RÍO ENTRE LA CARRERA 21B ESTE Y LA TRANSVERSAL 11 ESTE.	924
FIGURA 9 24. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA), EN EL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE LA CARRERA 21B ESTE CON CALLE 9B SUR Y LA CARRERA 8A.	925
FIGURA 9 25. DETALLE DE LOS MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA) ASOCIADO CON UNA PROFUNDIDAD DE 1.0 M, EN LA ZONA ENTRE TRANSVERSAL 11 ESTE Y CARRERA 7 ESTE.	926
FIGURA 9 26. DETALLE DEL MAPA DE RIESGO SOCIAL ASOCIADO CON UNA PROFUNDIDAD DE 1.0M, EN LA ZONA ENTRE LA TRANSVERSAL 11 ESTE Y CARRERA 7 ESTE.	926
FIGURA 9 27. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TV 11 ESTE Y CARRERA 7 ESTE. PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.	928
FIGURA 9 28. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TV 11 ESTE Y CARRERA 7 ESTE. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.	928

FIGURA 9 29. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TV 11 ESTE Y CARRERA 7 ESTE. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	929
FIGURA 9 30. MODELACIÓN DE FLUJOS PARA CONDICIONES EXTREMAS EN LAS QUEBRADAS LA PICHOSA Y EL TRIANGULO.....	930
FIGURA 9 31. DETALLE DE LOS MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA), RIESGO ECONÓMICO (CENTRO) Y RIESGO SOCIAL (DERECHA).....	931
FIGURA 9 32. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TV 1A ESTE Y CARRERA 6. PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.....	933
FIGURA 9 33. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TV 1A ESTE Y CARRERA 6. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	934
FIGURA 9 34. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA) PARA EL SECTOR ENTRE LAS CARRERAS 3G ESTE Y 6.....	934
FIGURA 9 35. DETALLE DEL MAPA DE RIESGO SOCIAL EN EL SECTOR ENTRE LAS CARRERAS 3G ESTE Y 6.....	935
FIGURA 9 36. ZONA DE INUNDACIÓN DEL RÍO SAN CRISTÓBAL ENTRE LA CARRERA 6 Y LA CARRERA 10 PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. CAUCE PRINCIPAL.....	938
FIGURA 9 37. ZONA DE INUNDACIÓN DEL RÍO SAN CRISTÓBAL ENTRE LA CARRERA 6 Y LA CARRERA 10 PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 100 AÑOS. CAUCE PRINCIPAL Y QUEBRADA RAMAJAL.....	938
FIGURA 9 38. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA) ASOCIADO CON UNA PROFUNDIDAD DE 1.0M, EN EL SECTOR ENTRE LAS CARRERAS 6 Y 10.....	939
FIGURA 9 39. ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN ENTRE TRANSVERSAL 1A ESTE Y CARRERA 6. PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	940
FIGURA 9 40. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA) Y RIESGO (DERECHA) ASOCIADO CON NIVELES DE FLUJO SUPERIOR A 1.0M, EN EL SECTOR DE LA PARTE BAJA DE LA QUEBRADA RAMAJAL.....	941
FIGURA 9 41. DETALLE DEL MAPA DE RIESGO SOCIAL ASOCIADO CON UNA PROFUNDIDAD DE FLUJO DE 1.0M, EN LA ZONA DE LA QUEBRADA RAMAJAL.....	941
FIGURA 9 42. MAPAS DE AMENAZA (IZQUIERDA), RIESGO ECONÓMICO (CENTRO) Y RIESGO SOCIAL (DERECHA) PARA UNA PROFUNDIDAD DE 1.0M A LO LARGO DE LAS QUEBRADAS EL TRIANGULO Y LA PICHOSA.....	942
FIGURA 9 43. MAPAS DE AMENAZA (SUPERIOR), RIESGO ECONÓMICO (MEDIO) Y RIESGO SOCIAL (INFERIOR) PARA UNA PROFUNDIDAD DE 1.0M A LO LARGO DE LA QUEBRADA VITELMA.....	945
FIGURA 9 44. OBRAS PROPUESTAS PARA REDUCCIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN.....	948

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa tipo flujo y las inundaciones están entre los eventos más frecuentes durante periodos invernales en la Ciudad de Bogotá. Históricamente se han presentado un gran número de estos procesos que han afectado tanto económica como socialmente la ciudad y sus pobladores. En la Tabla 1-1 se presentan las cifras de afectados por inundaciones, derrumbes y avalanchas en Bogotá entre el periodo 1943 y 1993, de acuerdo con la cifras obtenidas por ODIC (1995). En este informe se destaca que las inundaciones son el segundo tipo de amenaza más frecuente en la ciudad y que la mayor concentración de estos procesos es en el cuarto trimestre del año.

EFFECTOS SOCIALES POR INUNDACIONES, DERRUMBES Y AVALANCHAS EN BOGOTÁ

Localidad	Inundaciones					Derrumbes y avalanchas				
	Heridos	Muertos	Desaparecidos	Damnificados	Total	Heridos	Muertos	Desaparecidos	Damnificados	Total
1. Usaquéen		1		1120	1121	4	9		62	75
2. Chapinero	1	5		9134	9140	1	1			2
3. Santa Fé	2	3		6043	6048	9	19	4	398	430
4. San Cristóbal			4	116	120	5	2		1327	1334
5. Usme				0	0	5	7			12
6. Tunjuelito		2		6610	6612	3	7	4		14
7. Bosa				1757	1757	2	2		21	23
8. Kennedy				497	497	1	1		50	52
9. Fontibón				735	735	51	3			54
10. Engativá				0	0				40	40
11. Suba		1		688	689	20	7			27
12. Barrios Unidos				8508	8508	6	7		48	61
13. Teusaquillo	1	1		9044	9046	4	1			5
14. Martires	2	1		6810	6813	3	2			5
15. Antonio Nariño				390	390					0
16. Puente Aranda				0	0	4	2		40	46
17. Candelaria				0	0	1	3		997	1001
18. Rafael Uribe		1		26	27	4	18		8	30
19. Ciudad Bolívar		1		90	91	6	10			16
Subtotal	6	16	4	51568	51594	127	101	8	2991	3227

Tabla 1-1. Efectos sociales por inundaciones, derrumbes y avalanchas en Bogotá, periodo 1943-1993 (Tomado de ODIC, 1995).

Los movimientos en masa se refieren, en términos generales, a todo desplazamiento ladera abajo de material geológico debido principalmente a la fuerza de la gravedad. Esto, por supuesto, involucra un conjunto de tipos de movimiento con diversas características que abarcan desde la simple caída de un bloque de roca hasta movimientos lentos o rápidos similares a los de un fluido. Sin embargo, no hay un consenso universal sobre la clasificación de los mismos y es así como en la literatura especializada se encuentran diversos términos, y aún términos ambiguos para referirse a ellos. No obstante, se puede decir que uno de los sistemas más ampliamente aceptados por los especialistas en Ciencias de la Tierra es la clasificación propuesta por Varnes en 1978, posteriormente actualizada por Cruden & Varnes (1996). En ella, los movimientos se clasifican

principalmente de acuerdo con el mecanismo del movimiento y los materiales involucrados. Entre estos mecanismos se cuentan los movimientos tipo flujo, llamando así aquellos que presentan una deformación interna significativa del material.

Por su parte en la clasificación de Pierson y Costa (1987), tanto las inundaciones como los flujos están clasificados en función de la concentración de sedimentos que lleva el flujo. En esta clasificación, el comportamiento del flujo depende de sus propiedades reológicas, es así como las inundaciones con poca concentración de sedimentos se comportan como un fluido Newtoniano, mientras que los flujos a medida que aumenta su concentración de sedimentos se comportan más como un material no Newtoniano.

El área objeto de estudio será la cuenca de la Quebrada San Cristóbal en la Ciudad de Bogotá, que se caracteriza porque en su historia reciente ha generado procesos de flujo que han afectado la comunidad aledaña a las márgenes de la quebrada. Para el Quinquenio 1994-1998, la UPES reporta para la localidad un total de 5 eventos de desastre relacionados con inundaciones y 8 por procesos de remoción en masa (B & C, cia Ltda, 1999). Los eventos de inundación fueron asociados con crecidas por lluvias y mal manejo de sedimentos y capacidad insuficiente de las redes de alcantarillado, mientras que los deslizamientos fueron asociados con lluvias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general del proyecto es modelar potenciales flujos de detritos e inundaciones a lo largo de la parte alta de la Quebrada San Cristóbal, con el fin de diseñar medidas de mitigación de riesgos asociados con dichos procesos, con énfasis en el establecimiento de protocolos de alerta temprana dentro de la cuenca.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para cumplir con este objetivo se requiere la definición de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la parte alta de la cuenca de la Quebrada San Cristóbal desde el punto de vista topográfico, geológico, geomorfológico, hidrológico e hidráulico, geotécnico y social.

- Determinar de escenarios de diseño en términos de lluvias y sismos de diferentes periodos de retorno.
- Estimar los volúmenes de sedimentos a ser generados y movilizados en los escenarios de diseño por procesos de inestabilidad y erosión.
- Simular los eventos potenciales de flujos de detritos y flujos producto de escenarios críticos de lluvia y sismo.
- Evaluación del efecto de alternativas de medidas y obras sobre el comportamiento del flujo, a partir de su inclusión en la simulación matemática.
- Diseño de sistemas de alerta temprana.
- Comunicación de resultados del estudio a comunidades e instituciones interesadas en la zona de influencia del proyecto.

1.2 Justificación

Considerando el entorno geográfico de la ciudad, especialmente teniendo presente sus características geológicas, geomorfológicas y meteorológicas, así como el comportamiento hidráulico de muchos de los elementos que componen la red del sistema hídrico del Distrito Capital, se pone de manifiesto que la ciudad no está exenta de verse enfrentada a eventos tales como inundaciones y flujos de detritos.

Si bien la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias ha orientado recursos durante los últimos años, a obtener información acerca del comportamiento hidráulico e hidrológico de los principales cursos de agua de la ciudad y de sus zonas aledañas, existe aún la necesidad de obtener un conocimiento integral de las principales cuencas, incluyendo en ello, la evaluación de potenciales flujos de detritos.

Los flujos de detritos son objeto de investigación en el mundo, y si bien es cierto que se han logrado importantes avances en el entendimiento del mecanismo y modelación de los mismos, todavía hay muchos interrogantes que requieren de un alto esfuerzo a nivel de investigación.

Por otro lado, hasta ahora, el evento con mayores repercusiones sociales y económicas a nivel distrital, asociado a un evento de flujo de detritos, parece ser el ocurrido en la Quebrada Limas de la Localidad de Ciudad Bolívar, sin embargo, para la DPAE es claro que otros cursos de agua podrían en el futuro también ser afectados por procesos similares y por ello busca mediante el Convenio suscrito con la Universidad Nacional, aunar esfuerzos en la revisión o definición de metodologías para la elaboración de estudios de riesgo por este tipo de eventos, potenciando así la información disponible producida o recopilada por la DPAE y haciendo uso de las experiencias adquiridas por la Universidad dentro de sus

líneas de investigación relacionadas con el tema, especialmente las conseguidas en los estudios de las cuencas de la Quebrada Negra en los municipios de Quebradanegra y Útica en el departamento de Cundinamarca, de la Quebrada La Chapa en el municipio de Tasco, Boyacá y de las Quebradas La Honda y La Gusba en el Municipio de La Capilla, Boyacá.

La revisión y definición de metodologías posee una componente académica – investigativa completamente concordante con la misión de la Universidad Nacional y el área de Investigación y Desarrollo de la DPAE, pero lejos de ser un ejercicio puramente académico, se busca que la metodología adoptada sea evaluada y calibrada en una zona piloto: La cuenca alta del Río San Cristóbal.

La zona adoptada como piloto, si bien no es la más problemática en el Distrito Capital, para efectos de la implementación y calibración de la metodología producto del presente documento, resulta adecuada toda vez que reúne todos los factores que intervienen en la evaluación del riesgo para el tipo de amenaza de interés.

A saber, la zona piloto cuenta con un área rural y una urbana, está última densamente poblada y con graves problemas de vulnerabilidad física y social. Desde el punto de vista físico, la zona muestra una geología y una geomorfología bastante variada que refleja las particularidades del entorno geográfico de la ciudad; muestra regímenes hidrometeorológicos propios del clima de la Sabana, presenta problemas de inestabilidad de taludes a lo largo de las márgenes de los cursos de agua, presenta además variedad en cuanto a coberturas y usos del suelo y toda una serie de características que permiten brindar un contexto metodológico para ser aplicado a otros sectores del Distrito.

Otro de los fines perseguidos mediante el presente estudio, es el de definir el sistema de alerta temprana para el caso específico de la zona de estudio, bajo unas directrices generales que puedan ser tenidas en cuenta en futuros trabajos del mismo tipo.

Todo lo anterior enmarca el estudio como una herramienta primaria, útil en el corto plazo para la ejecución de estudios similares, además de realizar un aporte al estado del arte en relación con la gestión de riesgos.

1.3 Zona de Estudio

Geográficamente, la zona de estudio está localizada en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, sobre un altiplano a 2.600 m.s.n.m, circundado por estribaciones montañosas que superan los 3.500 m.s.n.m. Localmente el área de

estudio se encuentra dentro de la Localidad 4 de San Cristóbal, correspondiente al Sur Oriente de la Ciudad de Bogotá y se extiende no sobre el altiplano, sino sobre las estribaciones montañosas que se levantan progresivamente sobre el eje principal de la Cordillera, formando la cuenca del Río San Cristóbal.¹

El área de estudio, mostrada en la Figura 1-1. , compromete tanto zona urbana como rural, y su perímetro está delimitado así: la parte norte sigue la calle 1aS. desde la carrera 10a hasta la Diag 1S, continua por la vía que va desde esta última hasta el tanque El Consuelo (E.A.A.B), luego en línea recta hasta el Alto Aguanoso y por la divisoria de aguas finaliza en el Cerro de la Viga. Para la zona oriental el límite lo marca la divisoria de aguas que atraviesan los cerros y altos del Cable, Plazuelas, El Buitre, El Cajón y Cruz Verde. La parte sur al igual que la oriental, la marca la divisoria de aguas, desde el Alto de Cruz Verde hasta el Cerro de la Teta. Por último, la margen occidental del área de estudio comienza en el Cerro de la Teta hasta el Alto del Zuque, siguiendo la divisoria de aguas, hasta el cerro del Aguanoso y la Escuela Logística del Ejército Nacional.

En general, el límite norte del área de estudio es la localidad de Santa Fe, al oriente los municipios de Ubaque, Chipaque y Choachí, al sur la localidad de Usme y al occidente las localidades de Rafael Uribe Uribe y Antonio Nariño.

Los barrios inicialmente comprometidos en el estudio se mencionan a continuación: Nariño Sur, Quinta Ramos, La María, Santa Ana Sur, Las Brisas, Villa Javier, Sosiego, Velódromo, San Cristóbal, San Blas, San Pedro, Las Mercedes, Aguas claras, Montecarlo, Corinto, San Cristóbal Alto, La Gran Colombia, Los Laureles, Triángulo Bajo, Aguas Claras, Ramajal, Amapolas y Vitelma.

Dentro de la Localidad, se encuentran barrios y desarrollos residenciales que datan de finales del siglo pasado y nuevos desarrollos producto del crecimiento normal de la ciudad y de la migración producto de la violencia. Esto hace que el sector no sea homogéneo desde el punto de vista urbano; asentamientos ilegales en zonas consolidadas, en laderas de la parte alta y en rondas de quebradas son comunes en el sector.

En la parte rural de la zona de estudio nacen varios cursos de agua o quebradas como la Palo Blanco, La Moya, La Fotoga, La Upata, Laureles, La Osa, El Mortiño y Puerta Candado, las cuales son tributarias del río San Cristóbal, principal cauce de la zona. En la parte urbana también existen tributarios del río San Cristóbal, entre ellos Ramajal, La Pichosa y el Soche.

¹ Fundación PEPASO

Las aguas del Río San Cristóbal han sido utilizadas para abastecimiento de agua desde la época de la colonia cuando alimentaban la Plaza Mayor. Sus aguas dejaron de utilizarse con este fin a comienzos del siglo XVIII, pero nuevamente en 1914 se observa la existencia de un tanque de reserva abastecido con ellas. En 1923 se construyó el tanque del Alto de Vitelma y la extensión de redes domiciliarias de tubería de hierro. El tanque de Vitelma, interconectado al tanque de San Diego, empezó a recibir agua del embalse de la Regadera en el año de 1933. Posterior a la creación de la EAAB en 1955, se realizó el primer plan Maestro de Alcantarillado de la ciudad que incluye las obras del sistema Salitre y Fucha como cuencas de drenaje principales de la ciudad. En este plan se decidió conservar el alcantarillado combinado (aguas negras y lluvias) en la parte antigua de la ciudad, mientras que en los nuevos desarrollos se proyecta construir sistemas separados. ²

Respecto al clima, la zona cuenta con una temperatura promedio anual de 13.5 C° en la zona baja y 10.5 C° en la zona alta. Presenta dos períodos de lluvias: de marzo a mediados de junio y de septiembre a mediados de diciembre. Los períodos secos son también dos: de junio a agosto y de finales de diciembre a finales de febrero.

² Fundación PEPASO

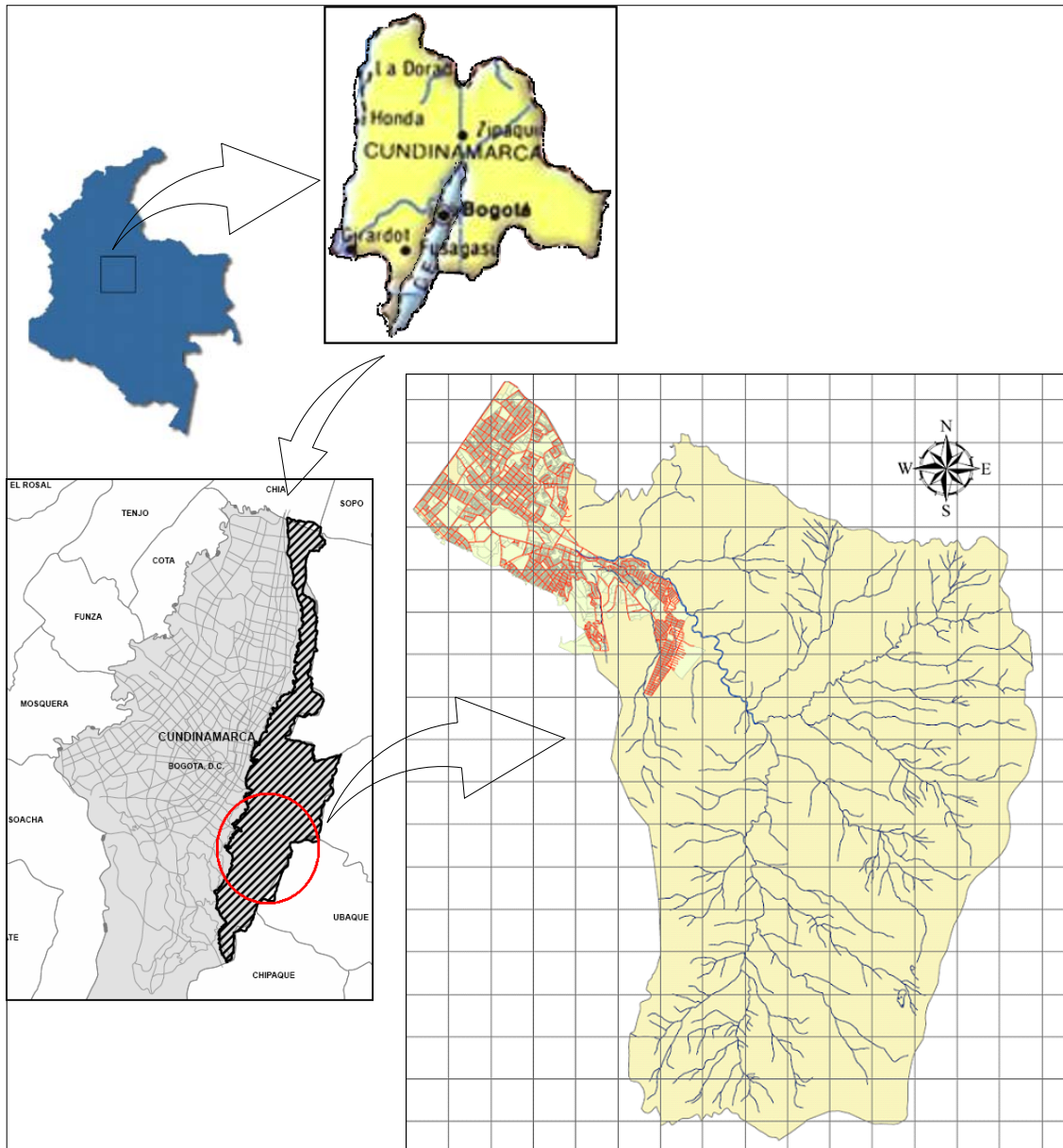


Figura 1-1. Zona de estudio.

1.4 Alcances

Los alcances definidos para la presente investigación se establecieron con base en el marco conceptual, metodológico y teórico que se presentan posteriormente en los capítulos 4 y 5. El proyecto se adelantará por fases de la siguiente forma:

Fase 1: Definición y caracterización de la cuenca piloto

Fase 2: Definición de escenarios de análisis

Fase 3: Modelación del flujo

Fase 4: Estimación del riesgo asociado con flujos de detritos e inundaciones en la cuenca piloto.

Fase 5: Análisis de alternativas de mitigación del riesgo.

Fase 6: Documentación y divulgación del estudio.

Adicionalmente se requiere de un trabajo de socialización e integración de la comunidad con el proyecto y sus resultados a través de un trabajo social a lo largo de todo el proyecto.

1.5 Actividades

Durante el desarrollo de la investigación se deben adelantar las siguientes actividades, las cuales están relacionadas con cada fase definida anteriormente:

Fase 1: Definición y caracterización de la cuenca piloto

1) Concertación

A través de un análisis conjunto entre la DPAE y la Universidad Nacional de Colombia se definirán los alcances y metas del estudio así como la forma de colaboración requerida para el logro de los resultados planteados.

2) Recolección y análisis de información disponible

En esta actividad se recopilará y analizará información de distinto tipo como: cartografía básica, fotografías aéreas, imágenes de satélite, mapas temáticos, datos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidráulicos, estudios anteriores (geológicos, hidráulicos, geotécnicos, de amenaza, de cobertura y usos del suelo), tales como los desarrollados por el DAMA y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, estudios de planeamiento y urbanismo, planos aprobados por DAPD y en general, toda la información que se considere representativa para el objeto del estudio.

3) Inspección de campo

Tiene como finalidad realizar una primera aproximación a las condiciones de las zonas a estudiar, mediante la identificación de los accesos y problemas puntuales objeto de estudio, con el fin de facilitar la planificación y ejecución coordinada de las actividades del proyecto. Así mismo como el inicio de la socialización del estudio y vinculación de la comunidad en el proyecto.

4) Levantamiento topográfico de cauces, aforos y muestreo sedimentológico

Estas actividades de campo son esenciales para los análisis hidrosedimentológicos, y a su vez complementan la actividad de elaboración de la base cartográfica detallada del área objeto de la modelación de flujo.

4.1) Levantamiento topográfico de la cuenca

Con el fin de que contar con mapas base, se hará la digitalización de la cartografía existente de la cuenca en el IGAC a la mejor escala disponible, este mapa servirá para hacer los análisis hidrológicos y de estabilidad de laderas dentro de la cuenca para identificar, en los escenarios de análisis, los caudales líquidos y sólidos que harán parte de los flujos.

El trabajo topográfico en campo consistirá en hacer el amarre de la cartografía digitalizada a placas del IGAC, con suficientes referencias materializadas para el replanteo posterior.

4.2) Levantamiento Topográfico Detallado de los Cauces

Con el propósito de realizar la calibración y aplicación del modelo matemático que se implementará en esta investigación y como parte esencial para la modelación hidráulica, se efectuará el levantamiento topográfico detallado del cauce principal en la cuenca piloto.

Esta información es básica también para la concepción de posibles obras de mitigación, para la toma de decisiones respecto a las mejores alternativas y para el estudio de diferentes procesos que se pueden presentar en el cauce (procesos de transporte de sedimentos, hidráulica del flujo, erosión de orillas, etc.).

Con dicha topografía se realizará la toma de perfiles longitudinales y secciones transversales representativas de tramos suficientemente largos, localizándolas a partir de las respectivas desembocaduras en dirección hacia aguas arriba y teniendo el cuidado de cubrir la llanura de inundación sobre ambas márgenes de los cauces. Especial atención debe darse a una adecuada referenciación

altimétrica de las secciones transversales y longitudinales de los cauces. Esta información servirá para implementar en el modelo matemático y permitir de esta manera la simulación de los diferentes procesos físicos.

4.3) Aforos líquidos

En ausencia de información hidrométrica, se propone la realización de aforos líquidos sobre la quebrada en secciones transversales definidas que se consideren importantes para el proceso de calibración del modelo matemático del flujo. Estos aforos se ejecutaran a partir del uso de trazadores.

4.4) Muestreo sedimentológico del material del lecho y de la banca de los cauces involucrados en el análisis

Para el efecto se requiere desarrollar un programa de muestreo para la recolección y análisis de muestras de material del lecho de los cauces en estudio, con el propósito de conocer la variación espacial (longitudinal) de las características y propiedades de este material, principalmente en cuanto al tipo y distribución de tamaños de sedimentos.

Espacialmente, las muestras deberán ser tomadas a lo largo del cauce de la quebrada tanto en el lecho como en las bancas.

5) Análisis hidrológicos

Con base en los registros de estaciones representativas para las zonas de estudio se determinaran los niveles de lluvia para diferentes escenarios de análisis, los cuales deben corresponder a una amplia variedad de periodos de retorno con el fin de hacer análisis de probabilidad de ocurrencia de flujos de diferente magnitud.

Para obtener los volúmenes líquidos dentro de la cuenca se debe hacer una caracterización de ésta en términos fisiográficos e hidroclimatológicos, con base en información general, datos y mediciones específicas de campo.

Se revisarán los antecedentes de inundaciones en la cuenca objeto de estudio, con el fin de elaborar, si es posible, un mapa de zonas inundadas y llevar a cabo un análisis que permita el entendimiento de los procesos torrenciales que se presentan.

5.1) Caracterización fisiográfica de la cuenca

Para analizar la respuesta de la cuenca ante los procesos de origen hidrológico, se determinarán algunos parámetros tales como la extensión y forma del área de

drenaje, la pendiente media del cauce y la pendiente media de la cuenca, la curva hipsométrica, el tiempo de concentración, jerarquización del orden de los cauces.

5.2) Caracterización hidrológica

Con base en la información de estaciones pluviométricas y/o climatológicas dentro y en los alrededores de la cuenca, se realizará un estudio para la caracterización hidrológica de la región, teniendo en cuenta los siguientes aspectos importantes para la modelación matemática del flujo.

a) Régimen de lluvias y clima

Con base en los registros de las estaciones pluviométricas y pluviográficas se elaborará el plano de isoyetas medias anuales multianuales, que permitirá conocer cómo es la distribución espacial de la lluvia sobre la cuenca y obtener valores de precipitación media. Se elaborarán histogramas con los cuales se caracterizará temporalmente el régimen de lluvias, y se identificarán los periodos húmedos y secos. Se hará igualmente un análisis de otros factores climáticos tales como temperatura, humedad relativa, etc., que permitan determinar las lluvias efectivas que ingresan al suelo y alteran su condición inicial.

b) Análisis detallado de las lluvias

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) sintetizan el comportamiento pluvial extremo de una zona y su determinación es de vital importancia para efectos de análisis y diseño. A partir de estas curvas se puede deducir la intensidad máxima de precipitación que se puede esperar durante un evento con determinada duración de lluvia, para un cierto período de retorno.

Usualmente las curvas IDF se determinan mediante el análisis del mayor número posible de registros pluviográficos pertenecientes a las estaciones ubicadas en proximidad a la zona de estudio. De ser posible, se elaborarán curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia de la precipitación en la cuenca.

c) Estimación de Caudales de Creciente

Los caudales deben estimarse mediante modelos hidrológicos lluvia-escorrentía. Para aplicar éstos modelos se requiere precisar la profundidad de precipitación máxima que se espera para determinados períodos de retorno (2 a 100 años), según lo indicado en el literal anterior. Los caudales estimados se calibrarán con los datos de lluvia y caudal que se tienen en la cuenca.

5.3) Análisis Hidráulicos y Sedimentológicos

En estos aspectos se considera el tránsito de los caudales pico por los cauces principales, la determinación de la capacidad de transporte sólido de las corrientes, así como la capacidad hidráulica de las obras de infraestructura construidas sobre el cauce, entre otros aspectos, para periodos de retorno de (5, 10, 25, 50, 70, 90 y 100 años).

Los análisis previstos enfatizarán en las condiciones que desde el punto de vista hidráulico deben ser incluidas en el modelo matemático de flujo, y entre ellas, la definición de condiciones especiales de tipo hidráulico que deben considerarse para los casos piloto para la obtención de hidrogramas de caudales líquidos y sólidos representativos. Se abordarán los siguientes casos particulares:

a) Análisis de caudales y niveles en los cauces

En este punto se caracterizará hidráulicamente la quebrada a estudiar en varios sitios en cuanto a caudales y niveles de creciente a partir de los datos de aforos, y de estimaciones a partir de secciones topográficas o estudios previamente realizados.

b) Análisis sedimentológico

Cumplido el muestreo sedimentológico, realizados los ensayos de laboratorio a las muestras tomadas y evaluados los resultados de los análisis granulométricos, se examinan dichos datos y se categorizan en función de su coherencia hidráulica o capacidad de permitir la reproducción adecuada de las características de los flujos de agua y sedimentos observados en el terreno, para poder generar hidrogramas característicos y que con la ayuda de los análisis geotécnicos, permitan establecer los volúmenes de materiales que se puedan movilizar producto de diferentes escenarios posibles, para los cuales se plantearán las medidas y obras de mitigación del riesgo.

En este análisis, se adelantará una labor de ubicación y regionalización de los diferentes tipos de depósitos sedimentológicos que se generan en los cauces, información ésta, claramente indicativa de los procesos ocurridos en el pasado y por tanto, de gran significado desde el punto de vista de la caracterización de los procesos que se desea estudiar y de la calibración del modelo matemático que se utilizará para la proyección de escenarios futuros, incluyendo el estudio de la efectividad de las obras de mitigación y control que se propongan.

6) Levantamiento Geomorfológico y Geológico

Para los análisis geomorfológicos y geológicos del proyecto piloto, se deben tener en cuenta las siguientes variables y aspectos:

6.1) Geomorfología

El objetivo es caracterizar las geoformas, sus géneros y morfometría, e identificar y caracterizar los procesos denudativos (erosión y remoción en masa) y para la evaluación de los procesos morfodinámicos. Se estudian sus tres componentes principales: morfogénesis, morfodinámica y morfometría.

La geomorfología local debe enmarcarse en una geomorfología regional y los criterios utilizados para definir unidades deben ser coherentes con la misma.

6.2) Geología

El objetivo es evaluar la información geológica disponible, realizar el levantamiento y caracterización de los materiales geológicos superficiales, describir sus aspectos estructurales y sus características de ingeniería como es la resistencia a los procesos de erosión y remoción en masa.

La geología local debe enmarcarse en una geología regional y los criterios utilizados para cartografiar unidades deben ser coherentes con la misma. Se debe realizar un levantamiento geológico detallado a nivel de unidad de roca, indicando descripción litológica y caracterización de depósitos recientes. Deben cartografiarse todas las unidades que a la escala de trabajo sean representativas (incluyendo materiales superficiales y el material subyacente). Identificar estructuras geológicas como fallas (regionales y locales, si las hay), anticlinales, sinclinales y diaclasas cuando se trate de un macizo rocoso, levantar como mínimo dos columnas estratigráficas y realizar la correlación de unidades.

7) Levantamiento de cobertura y uso del suelo

En torno al análisis de la cobertura vegetal y usos del suelo, el objetivo general dentro del proyecto es realizar un estudio multitemporal de la cobertura del suelo de la cuenca, para determinar los cambios ocurridos durante el tiempo en que se tenga la información suficiente para hacerlo y su influencia en los movimientos en masa de la cuenca y la condición actual de los mismos.

Para efectos del proyecto se entiende por cobertura todo aquello que cubre la superficie del suelo de la cuenca y que puede derivarse de ambientes naturales producto de la evolución ecológica (bosque, sabanas, lagunas, etc.), o a partir de ambientes artificiales creados y mantenidos por el hombre (cultivos, represas, ciudades, etc.). De otra parte, el término uso se aplica al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales.

8) Inventario de deslizamientos y procesos erosivos

Con el fin de determinar los mecanismos de falla comunes en la zona piloto y asociarlos con factores como tipo de suelo, inclinación del terreno, cobertura vegetal, entre otras, se requiere elaborar un inventario de los procesos actuales de inestabilidad y erosión en toda la cuenca.

Este inventario se desarrollará de acuerdo con la metodología propuesta por el INGEOMINAS y cubrirá la totalidad del área de estudio establecida para el proyecto, este inventario se complementará con los antecedentes de procesos dentro de la cuenca con base en los informes y estudios con que cuenta la DPAE.

La información recolectada en este inventario será utilizada para complementar el levantamiento geológico y geomorfológico. De otra parte, se hará un análisis estadístico de la información de manera que se puedan establecer correlaciones entre los diferentes parámetros y la susceptibilidad a inestabilidad de las laderas que permitan elaborar un mapa de susceptibilidad preliminar a movimientos en masa, que posteriormente se calibrará con otras capas de información temática y el conocimiento adquirido en campo.

En forma detallada deben ser analizados y cartografiados todos los procesos morfodinámicos, incluidos erosión y los movimientos de remoción en masa, para lo cual se debe realizar un análisis multitemporal que permita evaluar la dinámica de dichos procesos y su condición de estabilidad en términos de su estado de actividad, tendencia a la propagación (retrogresividad del proceso), espesor y velocidad, en términos de tipo de proceso, magnitud, grado de actividad, factores detonantes, recurrencia y material involucrado. Dichos procesos deben ser analizados y correlacionados a partir de los aspectos básicos identificados en su génesis (unidades geomorfológicas, geológicas, factor antrópico, etc.), de acuerdo con las condiciones particulares del sector.

Toda la información recolectada debe ser incorporada a un SIG cuya implementación y operación hasta obtener los productos resultado de los diferentes análisis.

9) Ensayos geofísicos

Dado que la exploración del subsuelo es limitada en este tipo de proyectos, una de las formas de estimación de espesores de suelo en algunos tipos particulares de laderas, es mediante la determinación de ensayos geofísicos de las diferentes capas de suelo bajo el terreno natural, la cual permite identificar la presencia de diferentes materiales bajo la superficie de la ladera. Este resultado, de ser factible su obtención, permite al geotecnista modelar la falla de la ladera con mayor precisión que un supuesto basado en las observaciones de campo.

Se sugiere la realización de tomografías eléctricas y líneas sísmicas que permitan no sólo definir los espesores de las diferentes unidades dentro de la cuenca, sino que además suministre algunos datos sobre parámetros y comportamiento del suelo ante cargas dinámicas.

10) Exploración del subsuelo y ensayos

Esta actividad contempla todos los trabajos de exploración del subsuelo mediante la toma de muestras y sus análisis en el laboratorio, requeridos para los estudios geotécnicos. Para el caso particular de los análisis sedimentológicos se limita a la realización de los ensayos a las muestras que fueron tomadas en el campo relacionadas con la investigación sedimentológica.

11) Exploración y ensayos para geotecnia

Para la realización del proyecto se plantea esta actividad como complementaria de los análisis geotécnicos, por tanto el muestreo se orienta entonces, a la determinación de parámetros físicos y de resistencia con base en la caracterización geotécnica previa de las diferentes unidades presentes en el terreno.

La exploración del subsuelo se realizará mediante perforaciones, cuyo número, localización y profundidad dependerán de las condiciones locales. La localización se determinarán una vez se cuente con el mapa geológico y geomorfológico.

En laboratorio se realizarán cortes directos, triaxiales, consolidaciones y clasificaciones.

12) Ensayos para sedimentología

En cuanto a los ensayos sedimentológicos, es indispensable contar con curvas granulométricas completas, para lo cual se optará por la mejor técnica disponible para obtenerlas, principalmente en lo relacionado con sedimentos pasa tamiz 200.

Fase 2: Definición de escenarios de análisis

1) Análisis de metodologías de evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Con el fin de identificar los modelos de análisis adecuados para la cuenca de estudio se requiere la revisión de diferentes estudios y propuestas metodológicas en relación con la zonificación por amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

2) Escenarios de análisis

Con el fin de estimar el riesgo se debe hacer un análisis de amenaza por flujos e inundaciones, los cuales pueden incluir sedimentos provenientes de procesos de inestabilidad y erosión dentro de la cuenca bajo diferentes eventos detonantes, de manera que se requiere definir los eventos detonantes que sean importantes en la generación de este tipo de procesos y obtener la magnitud de estos eventos para diferentes periodos de retorno. Con estos escenarios, que pueden surgir por combinación de diferentes detonantes, se busca construir mapas de amenaza tanto por inestabilidad como por erosión, los cuales ayudarán a definir cuáles son los principales detonantes y su relación con los procesos de inestabilidad y flujo.

En el caso de lluvias se requiere modelar la respuesta hidrológica de la cuenca para determinar caudales de flujo superficial y subsuperficial, para con ellos definir el potencial de inestabilidad y de erosión. En el caso de cargas dinámicas por sismo se requiere igualmente hacer un análisis de respuesta dinámica en toda la cuenca para determinar niveles de aceleración en superficie y analizar si son capaces de producir inestabilidad.

3) Análisis de estabilidad y volúmenes de sedimentos

Los aportes sólidos a un flujo pueden provenir de procesos actuales o potenciales de deslizamientos y erosión. Los aportes por procesos actuales deben identificarse por la posibilidad de que estos se reactiven o aceleren gracias a un agente detonante como las lluvias, sismos o la actividad antropogénica. Los aportes potenciales deben identificarse por la posibilidad de que nuevos procesos se generen por los mismos agentes.

Del inventario de deslizamientos se identificarán los mecanismos de falla típicos y sus volúmenes estimados, de manera que se puede asociar el volumen con las características del sitio; sin embargo, adicionalmente se requiere asociar los volúmenes con la intensidad de los agentes detonantes, lo cual constituye un análisis previo de amenaza de deslizamientos.

Para los escenarios adoptados se debe considerar la influencia de factores antropogénicos, en este caso se deben delimitar las áreas ocupadas y no ocupadas. Para las áreas ocupadas, definir la densidad y consolidación de la construcción y clasificar el nivel de intervención antropogénica (vertimientos inadecuados, descapote, rellenos y/o cortes no tecnificados, etc.), según su incidencia en el desencadenamiento de movimientos en masa y en la generación de avalanchas.

3.1) Análisis de estabilidad de sitios críticos

Durante el inventario de procesos se identificarán los sitios críticos en la cuenca piloto. Para estos sitios se hará el análisis de estabilidad con el fin de definir volúmenes potenciales de material disponible en dichos puntos. Los análisis de estabilidad de las laderas además buscan identificar el mecanismo crítico para diferentes solicitaciones (lluvia, sismo, etc.), de manera que la posibilidad de ocurrencia se asociará a la del evento detonante.

3.2) Análisis regional de estabilidad

El análisis de estabilidad en las diferentes zonas se hará con base en los mecanismos típicos identificados en el inventario, que en su mayoría son mecanismos de falla traslacional. El modelo de falla planar toma como insumo los niveles de agua obtenidos a partir de la modelación de la respuesta hidrológica de las laderas y arroja la aceleración crítica, la cual se compara con las aceleraciones esperadas para los diferentes periodos de retorno de la carga sísmica. Para la determinación de las aceleraciones esperadas se requiere de un análisis de amenaza sísmica que defina los valores de aceleración a nivel de roca y la estimación de la amplificación por geología y por topografía.

3.3) Determinación de volúmenes de sedimentos

Con base en el inventario de deslizamientos se definirá una función de susceptibilidad que permitirá la zonificación de la cuenca en áreas de mayor o menor susceptibilidad, a las cuales se les hará un análisis de amenaza con el objetivo de estimar volúmenes potenciales desprendidos o disponibles. Se debe establecer una función que permita estimar los volúmenes disponibles cuánto puede llegar a aportar a los flujos durante los escenarios de análisis.

Se debe considerar, en la estimación de volúmenes, la localización de actividades mineras en la cuenca y evaluación de los efectos de la minería que inciden en la susceptibilidad de la cuenca a inundaciones y flujos de detritos (aporte de sedimentos). Igualmente en los sitios críticos y que pueden en algún momento represar la quebrada se estimarán los volúmenes de sedimentos potenciales en caso de rompimiento de las presas naturales.

Fase 3: Modelación de flujo

1) Modelación

En la modelación de los flujos se propone utilizar como herramienta básica el modelo FLO-2D, el cual ha sido empleado en diversos lugares del mundo y se encuentra avalado por FEMA para el análisis de movimientos en masa tipo flujo e inundaciones.

Una vez conocido el desempeño del modelo FLO-2D se procederá a la calibración y aplicación del modelo a las condiciones propias de la zona de estudio, considerando diferentes escenarios de modelación, definidos a partir de los análisis previamente descritos.

Como actividades base del modelamiento se establecen preliminarmente las siguientes:

1.1) *Análisis bajo condición actual*

En esta etapa se buscará optimizar el uso del modelo matemático teniendo en cuenta factores importantes como el evento detonante, relación escorrentía–evento detonante, volúmenes de sólidos y líquidos, tipo o clasificación del flujo y características de los sedimentos, entre otros, todo esto a la luz de la información obtenida en el terreno para el caso de la cuenca piloto.

1.2) *Modelación numérica de escenarios probables y extremos*

Posteriormente se definirá una serie de escenarios de ocurrencia de eventos probables y extremos para realizar la simulación hidrodinámica del flujo considerando diferentes condiciones, tipos de eventos detonantes, e influencia de las obras existentes para mitigar el impacto de este tipo de eventos sobre la población.

1.3) *Condición con obras*

Para un evento recurrente, uno probable (en términos de su elevada afectación o características de alta amenaza), y uno extremo posible (generado por sismo y lluvia), se plantearán diversas obras en el caso que sea factible técnicamente hacerlo. Desde luego, en esta etapa se ensayarán diversas opciones de control de flujo para el caso particular, que, dependiendo de la efectividad que demuestren serán recomendadas como medidas de solución.

En esta fase también se debe hacer una evaluación de los efectos del proceso de urbanización y posibles cambios en la dinámica de las corrientes.

Fase 4: Estimación del riesgo

1) Evaluación de amenaza por inundación y flujos

Con base en los resultados de la modelación de los flujos se estimará la amenaza en términos cuantitativos a lo largo del cauce, además se determinarán las velocidades y alturas de flujo para un análisis de vulnerabilidad. Este análisis de amenaza generará diferentes escenarios para la estimación posterior del riesgo.

2) Evaluación de la vulnerabilidad

A partir de los niveles de flujo y velocidades se determinarán los posibles efectos sobre los diferentes elementos expuestos, esto implica hacer un inventario detallado de viviendas y sus características, redes de servicio y en general de todos los elementos que pueden ser afectados por los flujos, y la estimación de los daños potenciales. En ausencia de resultados de modelación del efecto de un flujo sobre diferentes tipos de estructuras, la evaluación de la vulnerabilidad se hará en términos cualitativos.

3) Estimación del riesgo

El riesgo definido como las pérdidas potenciales anuales debido a procesos de flujo a lo largo de la cuenca piloto se estimará a partir de los escenarios de amenaza, el inventario de elementos expuestos y los posibles daños generados por los flujos en términos de velocidad y altura.

Como diferentes periodos de retorno definen diferentes escenarios de amenaza, para cada uno se puede hacer una estimación del riesgo, con lo cual se puede construir una curva de riesgo como la combinación de las pérdidas potenciales en función del periodo de retorno del evento detonante (lluvias-sismo).

Fase 5: Análisis de alternativas de mitigación

1) Medidas estructurales

Como se mencionó anteriormente la modelación incluye el análisis de flujos considerando la implementación de obras a lo largo del cauce para prevenir, controlar y mitigar los efectos de flujos potenciales. Se determinará la efectividad de las medidas en términos de la reducción del potencial destructivo del flujo y de su costo.

Con relación a la reducción del potencial de destrucción el análisis se hará en términos de cambios en la velocidad y profundidad del flujo y la variación en el riesgo como consecuencia de la implementación de las obras.

Por otra parte se incluirá en el análisis de decisión sobre las diferentes alternativas, de manera que se pueda determinar la mejor alternativa en términos de reducción del riesgo, incluyendo el costo aproximado de las obras.

2) Sistema de alerta temprana

Con base en los resultados de la modelación se identificarán alternativas de mitigación como los sistemas de alerta. Se diseñará el sistema con base en relaciones de lluvia y niveles de flujo que permitan implementar sistemas físicos de alerta. En esta etapa se busca desarrollar una metodología que permita diseñar los sistemas de monitoreo requeridos en un torrente indicando que tipo de instrumentación debe implementarse con fines de alerta y estudio de los procesos torrenciales y que tipo de información debe recopilarse una vez se presente un evento de inundación en un torrente así como que tipo de análisis de esta información es necesaria.

Fase 6: Documentación y divulgación

1) Informe

Esta actividad contempla la edición e impresión de los resultados finales del proyecto.

2) Comunicación

Para el presente proyecto la Comunicación se define como el proceso interdisciplinario mediante el cual se construye un escenario de interacción entre el conocimiento técnico y el saber administrativo y popular. Dicha interacción busca por un lado, socializar los objetivos y resultados del proyecto y por el otro, brindar herramientas técnicas para la toma de decisiones tanto a nivel político-administrativo como a nivel comunitario frente a los posibles riesgos asociados a la amenaza objeto de estudio.

Tiene como objetivo generar herramientas metodológicas, mediante las cuales se logre que los distintos actores involucrados directa o indirectamente con la problemática de flujos de detritos e inundaciones puedan acceder, comprender y usar los resultados técnicos obtenidos en el desarrollo del mismo y su aplicación directa en el caso del área piloto.

El diseño de la estrategia de comunicación depende de la manera como se abordará el tema, el marco conceptual, los referentes, los grupos sociales que se pretenden involucrar, la forma como se involucrará a dichos grupos, el momento y los medios que se utilizarán. Así mismo, la metodología de comunicación se diseñará una vez se hayan definido los alcances de los objetivos específicos en concordancia con los objetivos técnicos del proyecto.

1.6 Personal

El personal que adelantó el proyecto está compuesto por los siguientes profesionales:

Director:	Ing. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Especialista en Geotecnia:	Ing. Javier García
Especialista en Geotecnia:	Ing. Oscar Ramírez Parra
Ingeniero Auxiliar Especializado:	Ing. Diana Yolima Jiménez
Ingeniero Auxiliar Especializado:	Ing. Andrés Martínez
Estudiante Ingeniería Civil:	Andrés Felipe Rios
Estudiante Ingeniería Civil:	Doris Liliana Cifuentes
Estudiante Ingeniería Catastral:	Alba Liliana Martínez
Estudiante Ingeniería Catastral:	Jhancir Póveda
Estudiante Ingeniería Geológica:	Edgar Alexander Rodríguez
Especialista en Hidráulica:	Ing. Carlos Eduardo Cubillos Peña
Especialista en Hidráulica:	Ing. Renny Balanta
Especialista en Hidráulica:	Ing. Fabio Bernal
Geólogo:	Geol. Julio Fierro
Sociólogo:	Rafael Suárez
Sociólogo:	Sonia Cantillo
Ingeniero Catastral:	Ing. Edgar Español
Laboratorista de suelos:	Edwin Bigoya
Laboratorista de suelos:	Manuel Caviedes

1.7 Estructura del documento

Los resultados de las actividades desarrolladas como parte de este proyecto se compilan en el presente informe que está compuesto por 9 capítulos que se organizaron como un reporte de investigación de la siguiente forma:

Capítulo 1-Introducción, en donde se definen los objetivos, alcances y actividades desarrolladas, así como la justificación del proyecto y sus ejecutores.

Capítulo 2-Antecedentes. En este capítulo se compilan los antecedentes relacionados con el área de estudio y en particular los que tienen que ver con el objeto de investigación, esto es las inundaciones, flujos de detritos y algunos de singular interés relacionados con otros procesos de inestabilidad.

Capítulo 3-Marco conceptual. El presente trabajo se enmarca en el concepto de Manejo del Riesgo, el cual se compone de diferentes elementos que son desarrollados a lo largo del proyecto. En este capítulo se hace una breve relación de los términos que se utilizan en el documento, y la descripción del marco conceptual general y de sus componentes.

Capítulo 4-Marco teórico. Los conceptos teóricos incluyendo modelos analíticos, modelos numéricos y procedimientos empleados en las diferentes actividades son descritos en este capítulo. Con el fin de contribuir a la identificación de modelos aplicables en nuestro medio este capítulo incluye no sólo aquellos modelos empleados sino que también en muchos de los temas abordados se incluyen otras metodologías encontradas a lo largo del desarrollo de la investigación, de manera que sirva, en algún momento, como fuente de consulta.

Capítulo 5-Metodología. Los procedimientos aplicados, bien sea asimilando procedimientos existentes y la generación de nuevos procedimientos son definidos y explicados en este capítulo. Se hace énfasis en este numeral a la definición de parámetros a utilizar en las modelaciones.

Capítulo 6-Información básica para la cuenca Quebrada San Cristóbal. Los procedimientos y métodos identificados se aplicaron a la cuenca de la parte alta de la Quebrada San Cristóbal, este capítulo compila la información primaria necesaria para la modelación de procesos en la cuenca.

Capítulo 7-Simulación y modelación de procesos. Este capítulo compila los resultados de las actividades adelantadas para obtener la información básica requerida para la aplicación de los métodos de evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Capítulo 8-Estimación del riesgo para la cuenca de la Quebrada San Cristóbal. En este capítulo se presentan y describen los resultados de la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones y flujos de detritos en la cuenca piloto.

Capítulo 9-Alternativas de mitigación. En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica referente a sistemas de alerta y alternativas de mitigación.

Capítulo 10-Recomendaciones. El análisis de la información y los resultados obtenidos permiten emitir algunas conclusiones importantes de carácter general al tema de estudio y algunas de carácter particular a la cuenca piloto, las cuales se compilan en este capítulo. Adicionalmente se presentan algunas recomendaciones a la DPAE sobre la aplicación e implementación de los procedimientos aquí presentados y se identifican temas de investigación futuros.

Capítulo 11-Referencias. Las referencias documentales consultadas para el desarrollo de esta investigación se presentan en este capítulo, el cual puede ser utilizado como una importante guía de consulta sobre el tema de estudio. En todos los temas tratados se hizo la consulta de la información y documentación más reciente que se encontró en las revistas especializadas.

Debido a la complejidad del proyecto, del gran volumen de información y datos obtenidos, los anteriores capítulos están acompañados por varios anexos, referenciados adecuadamente en cada capítulo, e incluidos como volúmenes individuales para facilitar su manejo.

La división del documento se presenta de la siguiente manera: Volumen 1 contiene Capítulo 1- Introducción, Capítulo 2- Antecedentes, Capítulo 3- Marco conceptual, Volumen 2 contiene Capítulo 4- Marco teórico, Volumen 3 contiene Capítulo 5- Metodología, Volumen 4 contiene Capítulo 6- Información básica de la cuenca del Río San Cristóbal, Volumen 5 contiene Capítulo 7- Simulación y modelación de procesos en la cuenca de la Quebrada San Cristóbal, Volumen 6 contiene Capítulo 8- Estimación del riesgo para la cuenca de la Quebrada San Cristóbal, Capítulo 9- Alternativas de mitigación, Capítulo 10- Recomendaciones, Capítulo 11- Bibliografía. Volumen 7 contiene Anexo A, Volumen 8 contiene Anexo B 1-5, Volumen 9 contiene Anexo B 6, Volumen 10 contiene Anexo C, Volumen 11 contiene Anexo D, E y F, Volumen 12 Contiene Anexo E-1 y el Volumen 13 contiene Planos y la información cartográfica en formato digital con sus respectivos metadatos.

CAPITULO 10

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la cuenca de la Quebrada San Cristóbal se han reportado un gran número de casos de inestabilidad de las laderas y en una menor proporción casos de inundación, no se han identificado casos de flujos de detritos a lo largo del cauce por lo menos en el pasado reciente.
2. Inundaciones se han reportado a lo largo de las quebradas Aguas Claras y El Pilar, sin embargo la extensión y fecha de ocurrencia no se ha determinado. En 1994 se registró un flujo de escombros a lo largo de la Quebrada Aguas Claras afectando algunas viviendas; el material transportado fueron escombros dispuestos en las márgenes de la quebrada. Estos antecedentes confirman la posibilidad de inundación y flujos de detritos que se obtuvieron en las modelaciones hechas para el presente proyecto. En el caso de la Quebrada El Pilar (El Triángulo) se reportan evidencias de flujos en fotografías aéreas de 1945. Los predios afectados en el pasado están localizados en la zona de protección ambiental.
3. Las causas de los eventos de inundación se han producido por taponamiento debido a ramas y escombros arrojados a los cauces.
4. La gran mayoría, si no todos, los estudios anteriores han concentrado la mitigación del riesgo a la construcción de obras y poco o nada se ha enfocado a medidas no estructurales como manejo integral de la cuenca o la implementación de sistemas de alerta.
5. Los métodos de análisis utilizados para evaluar vulnerabilidad y riesgo son de tipo cualitativo, los cuales no cuentan con un soporte teórico muy claro.
6. En el caso de los análisis de amenaza, aunque se hacen de manera estadística se observa que no están asociados con métodos de evaluación cuantitativa del riesgo, por otra parte la definición de probabilidad de falla no está definida para ningún tiempo determinado como un año, que es lo normal en este tipo de análisis. Adicionalmente los Coeficientes de Variación de las variables no se obtuvo de datos reales sino que se asumieron sin ningún criterio.

7. La gran mayoría de los estudios no incluyen una evaluación de la vulnerabilidad física, ni el análisis de las implicaciones de estas en la evaluación del riesgo.
8. En cuanto a las causas de los procesos de inestabilidad se destaca el mal manejo de las aguas lluvias y aguas servidas, lo que afecta la resistencia y estabilidad de las ladera y cortes.
9. En el caso de las inundaciones se identifican como causa principal la reducción de la capacidad de las obras hidráulicas por el vertimiento de desechos sólidos sin control.
10. El cauce se ha visto comprometido por procesos de inestabilidad de las laderas adenañas, en los sectores de los barrios Aguas Claras, Montecarlo, Manila-Gran Colombia y Laureles. Una vez hechas las visitas de campo se ha podido constatar que no ha habido intervención en estas zonas para su estabilización. Los mecanismos de falla más comunes son de tipo trasnacional a lo largo de la interfase entresuelo residual o coluvial y el sustrato rocoso.
11. Las zonas afectadas por deslizamientos muestran socavación activa en la pata de las laderas, lo que sugiere la necesidad de obras de control de erosión en estos sectores.
12. En términos de coberturas se observa que la mayor parte de la cuenca, en su sector rural, está protegido por bosques, los cuales se concentran en los depósitos coluviales identificados en la geología, los cuales se presentan en las partes medias y bajas de la cuenca. En las partes altas donde predominan los afloramientos en roca, la cobertura es predominantemente matorrales y arbustos. En la parte baja se tiene algunos pastos particularmente cerca de las bancas de la quebrada principal.
13. No existe unificación de procedimientos para la presentación de los mapas de Geología para Ingeniería y Geomorfología, de manera que es difícil consolidar la información en estos aspectos.
14. Con base en la clasificación de flujos y a los niveles de concentración que se presentan en los diferentes escenarios analizados en el presente proyecto, los flujos en la quebrada San Cristóbal se pueden clasificar como Flujos de Agua.
15. Las estrategias de mitigación del riesgo deben surgir de un estudio de riesgo cuantitativo, evaluado en términos económicos y sociales. Los análisis de amenaza no pueden quedar aislados y los métodos que se

- adopten deben estar de acuerdo con alguna metodología de riesgo pre-establecida.
16. Varios y variados métodos de evaluación de vulnerabilidad social han sido desarrollados, pero en ninguno de ellos se establece cómo se pueden incluir en cuantificación del riesgo. Siendo así, los resultados de vulnerabilidad social parecen aislados y marginales al objetivo final que es la mitigación del riesgo.
 17. No existen en nuestro medio criterios, de ningún tipo, para definir los niveles de riesgo aceptable y tolerable. A primera vista, los criterios que se manejan a nivel internacional parecen muy altos para la realidad nacional, en términos de la frecuencia de eventos y de los escasos recursos con que se cuenta para la mitigación del riesgo.
 18. Existe un importante número de estrategias de mitigación del riesgo, adicionales a las medidas estructurales, sin embargo, en nuestro medio estas han sido las que más se recomiendan en los estudios de amenaza y riesgo.
 19. Un estudio de riesgo está compuesto por un gran número de actividades y objetivos parciales que lo hacen muy complejo, de manera que debe haber claridad en el método que se va a aplicar desde el inicio del estudio, para focalizar los recursos y análisis a la obtención del resultado final. En el presente estudio, por su naturaleza, no fue muy claro en este sentido y se logro percibir que algunas de las actividades desarrolladas fueran aisladas y del personal que participó en él, no asimilaron completamente el método y su labor pareció inconexa con los demás.
 20. Debido a la complejidad de un análisis de riesgo, éste requiere de la participación de varios especialistas en diferentes temas, los cuales deben todos manejar el mismo lenguaje y comprender de igual forma el marco general del manejo del riesgo.
 21. La información básica que se requiere obtener en un estudio de riesgo debe estar asociada con un tipo y modelo de evaluación determinada, debido a que la gran cantidad de atributos que tiene una unidad de terreno no permiten que de manera rápida y económica se obtengan todos, de manera que el trabajo de campo debe ser focalizado a los requerimientos del modelo a utilizar.
 22. Debido a lo anterior antes de iniciar un estudio de amenaza o riesgo se debe definir que modelo o técnica se va a aplicar. La consulta de bibliografía especializada en el tema objeto de estudio permitió identificar

diversos y variados modelos, cuyos requerimientos de información son igualmente diversos, de forma tal que los anexos de este capítulo pueden ser usados como guía para definir el modelo que más convenga en función de los objetivos planteados y la información básica que se requiere obtener.

23. Existen diferentes sistemas de clasificación geomorfológico del terreno, algunas en función de los paisajes resultantes y otros en función de los procesos que los generaron. Para fines de zonificación y evaluación de amenaza y riesgo por procesos morfodinámicos el segundo tipo de clasificación es más aplicable. Un ejemplo típico de este tipo de clasificación es el propuesto por el ITC de Holanda, desafortunadamente en nuestro medio ese sistema no ha sido ampliamente aplicado.
24. El modelo de la SCS para la estimación de los caudales, a pesar de ser empírico es una herramienta muy fácil de aplicar, sin embargo es importante que se implemente la modelación física para definir la lluvia efectiva y los caudales de diseño, los cuales controlaran los resultados de la modelación de los otros procesos dentro de la cuenca, tales como la erosión o la respuesta hidrológica de las laderas.
25. La técnica de trazadores para los aforos líquidos utilizada en el presente estudio no ha mostrado ser muy confiable, entre otras cosas porque el marco teórico y conceptual sobre el que se fundamenta no es claro.
26. La técnica de procesamiento de imágenes de satélite para la definición de las coberturas ha mostrado un alto grado de precisión y permite hacer la identificación de coberturas en amplias áreas de manera rápida.
27. Uno de los grandes problemas en la zonificación de amenaza a nivel regional aplicando modelos físicos está en la caracterización del modelo geotécnico de la zona. La mayoría de los modelos hacen generalizaciones que reducen la confiabilidad de los resultados. La identificación de los perfiles geotécnicos por métodos directos es muy costoso por lo tanto se requiere en estos casos contar con las técnicas geofísicas que permiten abarcar grandes áreas y profundidades de manera más rápida y relativamente sencilla. Estas técnicas requieren que se presente un marcado contraste entre los diferentes estratos para que sus resultados sean confiables como fue el caso de la cuenca de la Quebrada San Cristóbal.
28. El modelo de estimación de pérdida del suelo USLE y su modificación RUSLE son una herramienta valiosa para este fin, sin embargo, debido a que es un modelo empírico es muy sensible a las condiciones en que se definieron las funciones y correlaciones en que se basa, por esta razón es

importante tratar de calibrarlo o validarlo con base en datos locales. Para el presente estudio se hizo una calibración utilizando algunos resultados de la cuenca del Río Tunjuelito.

29. Los métodos de equilibrio límite han mostrado grandes ventajas en la zonificación de amenaza gracias a que se pueden implementar de manera relativamente fácil en un SIG. Por otra parte la posibilidad de incluir en la formulación los análisis de respuesta hidrológica y dinámica los han convertido en una herramienta fundamental en el desarrollo de nuevos modelos y técnicas de evaluación de amenaza.

30. En relación con la respuesta hidrológica de las laderas y su influencia en la estabilidad existen dos tendencias, la primera es transformar los volúmenes de infiltración en cambios en el nivel freático, sin embargo cuando el espesor del suelo es grande las intensidades y duración requeridos para un cambio significativo en el nivel freático son muy grandes de manera que la modelación no muestra una relación clara entre la lluvia y los deslizamientos.

Por otro lado está la de hacer el análisis de estabilidad del volumen de suelo por encima de la línea de avance húmedo, dentro de la cual se considera flujo trasciente. Los resultados de este tipo de análisis muestran una mejor relación con las observaciones de campo en términos de profundidad y mecanismo de falla.

31. A pesar de que existen varios modelos de tránsito de flujos, en su mayoría requieren de parámetros que no son fáciles de obtener tales como la concentración de sedimentos y la viscosidad del flujo. El modelo FLO 2D ha mostrado sus ventajas en el ejercicio de zonificación por amenaza debido a flujos, sin embargo la precisión de la topografía utilizada controla la confiabilidad de los resultados.

32. Para la evaluación de amenaza por flujos de detritos e inundaciones la práctica común ha utilizado los mapas de inundación como herramienta, los cuales tienen la ventaja de que se pueden evaluar diferentes escenarios de riesgo, los cuales pueden ser comparados de manera fácil. Existen otras técnicas desde las empíricas hasta las de modelos estocásticos que han sido utilizadas en estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Para este estudio se optó por desarrollar un método que obedece de manera rigurosa con las definiciones de amenaza y riesgo que se presentaron en el marco conceptual de este trabajo. Esto es la construcción de mapas que muestran la distribución de la probabilidad de ocurrencia de un flujo de cierta

magnitud, y a cada uno de ellos se le definió la vulnerabilidad y el riesgo asociado.

33. No se encuentra en la literatura especializada información sobre modelación física de la vulnerabilidad de estructuras. El trabajo más sólido con relación a este tema es la tesis doctoral de Kelman (2002), aunque este documento da buenas luces sobre la forma de abordar el tema, los resultados no se presentan como curvas de vulnerabilidad para ser aplicadas en estudios de riesgo, por otra parte los sistemas estructurales por él analizados son muy diferentes a los que encontramos en nuestro medio.

Para el presente informe se optó por considerar las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas de la misma forma como lo sugiere Kelman, a partir de lo cual se definió una presión equivalente sobre los diferentes tipos de estructuras identificados en la zona piloto con el fin de estimar las derivas generadas por esas presiones. Desafortunadamente no se pudo encontrar datos para que a partir de las derivas se pudieran determinar los niveles de daño de las estructuras, por lo cual se debieron utilizar las curvas de vulnerabilidad que se han desarrollado para evaluación de amenaza sísmica.

34. No se encontraron estudios rigurosos para la determinación de la vulnerabilidad física de las personas ante inundaciones y flujos. Sólo se identificaron algunos valores de vulnerabilidad en función de consideraciones subjetivas como la presencia de las personas dentro o fuera de estructuras. Un sólo documento trata de relacionar de manera empírica la vulnerabilidad de las personas con las características de los flujos, de manera que para la aplicación rigurosa de la definición de riesgo en términos de afectación a la población se asumieron de forma arbitraria algunos valores de vulnerabilidad, sin embargo es recomendable verificar, en la medida de lo posible, su aplicabilidad con base en registros históricos.
35. Los modelos de vulnerabilidad social que se han propuestos se basan en su mayoría en factores regionales y nacionales, de manera que su aplicación a zonas más pequeñas, como un barrio, se hace muy difícil por falta de información detallada. Para la escala de trabajo del presente estudio el modelo de Bollin y Hidajat (2006) fue el que más ventajas presenta para su adaptación, por lo que éste fue utilizado como documento base, el cual se discutió y modificó con la participación de funcionarios de la DPAE.
36. Los modelos de vulnerabilidad social analizados y resumidos en el presente trabajo incluyen elementos de amenaza y en general son más índices de

riesgo que un valor real de vulnerabilidad. El modelo utilizado como base en este trabajo, por ejemplo, incluye como uno de los factores la amenaza en términos de su frecuencia y magnitud, sin embargo debido a que este proyecto hace una valoración cuantitativa del riesgo no se consideró este factor dentro de los indicadores de vulnerabilidad social.

37. La obtención de la topografía para el presente proyecto no fue fácil debido a que en la parte rural no se ha hecho un levantamiento detallado. La topografía utilizada debió obtenerse de la combinación de planos de diferente escala y diferente origen, los cuales no coincidieron al momento de empalmarlos, de manera que se requirió la aplicación de algunas técnicas de homogenización de las curvas de nivel.
38. Para los estudios de amenaza y riesgo de una cuenca en términos de la modelación física de procesos, se requiere una topografía por lo menos escala 1:5000, para que los productos que surgen de ella, tales como división en sub-cuencas o laderas tenga un adecuado nivel de precisión, en particular para los procesos de generación de sedimentos como la erosión y los análisis de estabilidad.
39. Las secciones transversales que se levantan en diferentes puntos de la quebrada son fundamentales para garantizar la precisión de la modelación de los flujos. La separación de estas es función de la pendiente del cauce. No existe una regla definida para la localización de las secciones, por lo que estas deben ser definidas en campo. Para el presente estudio se determinaron unos puntos fijos, como son las entregas de los cauces superiores al cauce principal. Aquellas que se localizaron a lo largo del cauce principal se separaron sistemáticamente a 500 m de distancia y otras se localizaron en sitios de particular interés como la zona de Aguas Claras donde se observaron procesos de inestabilidad.
40. El levantamiento geológico del presente estudio es un aporte importante para el conocimiento del marco estructural de los cerros orientales. La información del estado de esfuerzos que se hizo para este trabajo puede ser útil para la identificación de la relación de los estados de esfuerzo con los mecanismos de falla en macizos rocosos en la zona.
41. En términos generales, desde el punto de vista geológico, se observa que la cuenca la parte central de la cuenca está cubierta por depósitos coluviales que alcanzan espesores de hasta 7 m en la base de las laderas contiguas a la quebrada San Cristóbal. La quebrada corre sobre estos depósitos coluviales lavando la matriz fina y dejando los grandes bloques

de arenisca como material de lecho, el cual sirve de coraza contra procesos de socavación.

42. Las partes altas de la cuenca están dominadas por afloramientos de macizos rocosos, los cuales debido a su alto fracturamiento y pendiente muestran procesos de inestabilidad tipo caída de rocas. Los volúmenes de estas caídas son muy pequeños y no aportan directamente al cauce durante un evento.
43. Las fotografías aéreas que incluyen la zona de estudio permiten un análisis multitemporal de las coberturas y uso del suelo así como de los procesos de inestabilidad que han ocurrido en la zona de estudio. Estas imágenes a su vez han permitido la complementación del trabajo de campo en geología y geomorfología.
44. Como técnica para la evaluación de los caudales dentro de la cuenca para diferentes periodos del año se adoptó el uso de trazadores, el cual se consideró más apropiado por las bajas profundidades de flujo. Se debe resaltar que el empleo de esta técnica de cierta forma fue experimental por la falta de experiencia en su uso, por lo que se contrató una empresa especializada para su implementación y análisis.
45. Con el fin de estimar la capacidad hidráulica del cauce y las estructuras a través de él, se consideró importante hacer primero un análisis con el modelo HEC-RAS, sin embargo, con el fin de incluir los aportes de sedimentos, la modelación final de los flujos se hace con el modelo FLO2D.
46. Pensando en unificar los inventarios de deslizamientos que se hace en el país, el INGEOMINAS, como parte del Proyecto Multinacional Andino, desarrolló un formato para la captura de la información en campo y en oficina. En el presente proyecto se adoptó este formato, sin embargo una vez hecha su aplicación se observa que hay dificultades tanto logísticas como conceptuales en el diligenciamiento del formato, que desdice de su aplicabilidad.
47. Debido a la falta de autorización de la CAR para adelantar un programa extensivo de exploración del subsuelo, ésta se limitó a la obtención de muestras por perforación manual que no permite profundizar mucho, de manera que se complementó con métodos geofísicos para poder determinar los espesores de suelo. De la exploración manual se obtuvieron las muestras inalteradas para ejecutar los ensayos mecánicos requeridos para la caracterización del suelo.

48. Las fichas catastrales son una fuente de información muy importante para la tipificación y valoración de los elementos expuestos. Desafortunadamente la información del censo no es igualmente confiable y útil.
49. A pesar de que se pudieron identificar las líneas vitales que sirven a la zona, no se pudo hacer el análisis de riesgo por la afectación de esas estructuras por no contar con funciones de vulnerabilidad y evaluación de costo de potenciales pérdidas en ellos.
50. La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo tal y como está propuesta en los textos estima volúmenes demasiado grandes de sedimentos por erosión. Para el presente proyecto se empleó una relación de producción de sedimentos obtenida a partir de datos para la cuenca del Río Tunjuelito. La aplicación de estos factores de producción permiten una estimación de volúmenes más acertada.
51. Para el caso de la producción de sedimentos por deslizamientos se encontró que la mayoría de los estudios están definidos para periodos largos de tiempo, esto es entre 25 y 50 años y los valores de producción de sedimentos de cuencas pequeñas están del orden de 0.4 y 0.6. Por esta razón a los volúmenes estimados con el análisis de estabilidad de laderas deben también ser afectados por un factor de producción. En el presente proyecto se aplicó un factor para la producción de las sub-cuencas y otro para la cuenca principal.
52. Los escenarios de análisis generados por la combinación de lluvias y sismos de diferentes periodos de retorno permiten un análisis de sensibilidad de la respuesta de la cuenca con relación a la influencia de las diferentes fuentes de sedimentos. Es evidente que no todos los estudios pueden hacer este tipo de análisis por lo que sus resultados serán de gran utilidad para resolver inquietudes relacionadas con la identificación de los principales factores que condicionan las características del flujo.
53. Para la escala de trabajo no es práctico hacer análisis de respuesta dinámica de laderas, por lo tanto las aproximaciones empleadas en este trabajo son una guía útil para incluir esta respuesta de manera sencilla. La amplificación por geología, se determina utilizando el resultado de Pergalani (1999) quien hizo análisis unidimensionales para diferentes combinaciones de estratigrafía y espesor de depósitos, a partir de lo cual propone algunos factores de amplificación que pueden ser empleado en condiciones similares. Por su parte, para la amplificación topográfica, el código Francés

propone factores de amplificación en término de la forma en perfil de las laderas.

54. El método propuesto para la evaluación de la amenaza sigue en rigor la definición matemática. Este tipo de análisis no es común debido a que su implementación no es difícil. Para un estudio convencional este se puede construir con un número relativamente pequeño de corridas del modelo de flujo. Si se consideran los mismos escenarios que aquí se tomaron se requieren 42 corridas.
55. La vulnerabilidad física de estructuras se estimó modelando el comportamiento estructural de los diferentes tipos de edificaciones identificados en la zona de estudio. Las presiones consideradas fueron la hidrostática y la hidrodinámica de acuerdo con lo propuesto por Kelman (2002). En este estudio las presiones se transformaron en una fuerza equivalente cuya respuesta es un campo de derivas de la estructura, a partir de las cuales se estimó el nivel de daño potencial. Debido a la escasez de información con relación a los daños asociados con diferentes niveles de deriva la vulnerabilidad se evaluó combinando los desplazamientos obtenidos de la modelación estructural con curvas de fragilidad propuesta para estudios de amenaza sísmica. El procedimiento se considera válido en la medida en que el parámetro fundamental es el desplazamiento horizontal de la estructura independiente cual sea la fuerza que lo produce.
56. El Índice de Vulnerabilidad es un parámetro que permite afectar las pérdidas esperadas por el grado de preparación y de resiliencia que tenga la zona de estudio. La obtención de los indicadores y del índice final requiere de una gran cantidad de información que no siempre está disponible, por lo tanto la definición final del indicador dependerá de la disponibilidad y calidad de información en relación con las variables utilizadas para definir los indicadores. Se encontró que las entrevistas focalizadas y los talleres con la comunidad son una fuente primaria de información que bien diseñadas pueden suplir la información secundaria.
57. En relación con la estimación de los costos de los elementos expuestos se proponen sendos métodos para obtener el valor de predios urbanos y de predios rurales. Es importante ver como de acuerdo con estos métodos el costo por metro cuadrado de suelo rural es más valioso que el de un predio rural, al final del proyecto se observa que esto condiciona los valores de pérdidas esperadas calculadas.

58. La parte alta de la quebrada San Cristóbal muestra una topografía de gran pendiente desde los flancos hacia el centro del valle, el cual está cubierto por un depósito coluvial profundo. Sin embargo, el perfil de la quebrada presenta una pendiente media, lo que se ve reflejado en pequeñas profundidades de socavación sobre el fondo del cauce.
59. Las secciones topográficas del cauce muestran perfiles de mayor pendiente en la parte baja, en donde también se encontró que la estabilidad es marginal.
60. En términos generales las unidades geológicas superficiales que se encontraron en la cuenca muestran que las partes superiores afloran las unidades rocosas correspondientes a las Formaciones Chipaque, Guadalupe, Cacho, Guaduas y Bogotá. Estas de manera general se pueden describir como intercalaciones de areniscas, lutitas y arcillolitas. En las partes medias y zonas de menor pendiente se tienen suelos residuales de estas Formaciones, principalmente de la Formaciones Chipaque, Guaduas y Bogotá, y en las partes bajas se presentan depósitos coluviales que aumentan de espesor desde la parte superior hacia el centro del valle.
61. Los macizos se caracterizan por presentar un alto grado de fracturamiento y plegamiento con altos buzamientos debido al intenso tectonismo al que se ha expuesto, los que se reflejan en la generalización de procesos de caídas de roca en las partes altas de la cuenca. En algunas zonas se identificaron deslizamientos trasnacionales en roca asociados con cortes artificiales.
62. En los suelos residuales se observan algunos procesos de tipo traslacional más asociados con flujos lentos asociados con saturación del suelo. En los depósitos coluviales, en las partes altas y medias predominan los movimientos planares y flujos de detritos y lodo localizados. En la parte baja de las laderas predominan los deslizamientos rotacionales de depósitos coluviales asociados con la socavación de la pata de la ladera por la acción de la corriente. Algunos de los depósitos coluviales en la parte media y baja de las sub-cuencas son de tipo fluvio-torrencial.
63. Los coluviales que muestran mayor concentración de deslizamientos son aquellos que muestran un estructura matriz soportado como los encontrados en el sector de Aguas Claras y La Quebrada La Pichosa.
64. En la parte más inferior de la zona de estudio se tienen los depósitos de conos aluviales muy antiguos que alcanzan hasta 90 m de espesor. El cauce discurre sobre la parte superior de este depósito afectando una profundidad del orden de 3 a 5 m, en los cuales se pueden observar

procesos de inestabilidad de las bancas asociados con erosión lateral y por el efecto de las aguas servidas que no cuentan con entregas adecuadas.

65. En el sector del Páramo de Cruz Verde, se observa un depósito morrénico caracterizado por ser un depósito clasto soportado con matriz limo-arcillosa. Esta unidad no presentan procesos de inestabilidad.
66. Un aspecto importante del sector es la presencia de depósitos de cenizas volcánicas que condicionan las características hidrológicas de la cuenca como se muestra en el análisis de infiltración.
67. En las zonas de depósitos coluviales en particular los de alta pendiente las fallas planares superficiales brindan la oportunidad para que la acción del agua genere el carcavamiento. En suelos residuales se han observado algunos procesos de erosión superficial tipo laminar.
68. La distribución de los procesos identificados en las diferentes zonas y épocas muestran claramente la relación entre las unidades superficiales y mecanismos de falla.
69. Con base en el registro de procesos identificados en los diferentes informes y conceptos en el SIRE se puede observar que el mal manejo de las aguas servidas y aguas lluvias son la principal causa de los procesos. Estos reportes están concentrados en la parte urbana y semi urbana en el sector de Aguas Claras, Montecarlo, Gran Colombia y La Cecilia. Como se verificó en los análisis de estabilidad estos procesos no sólo están asociados con las condiciones de agua sino que también son los materiales que menores parámetros de resistencia presenta.
70. El mapa de susceptibilidad estaba planteado como producto intermedio de un análisis de amenaza o distribución de zonas potencialmente inestables en la cuenca si éste se hiciera con un modelo empírico o semi-empírico (modelos multivariados), sin embargo, debido a que para la estimación de volúmenes por deslizamientos se implemento un modelo físico, el mencionado mapa de susceptibilidad no fue necesario.
71. La zona empieza a desarrollarse urbanísticamente hacia 1945, antes de eso las coberturas predominantes eran bosques y arbustos naturales y algunos cultivos. Entre 1953 y 1983 se presenta el mayor avance urbano en la zona de Aguas Claras, Laureles, Montecarlo, San Cristóbal Sur y Tibaque Urbano. En los análisis multitemporal de procesos morfodinámicos se observa claramente cómo en estas mismas zonas en ese mismo periodo se generalizan los procesos de inestabilidad y erosión.

72. En las partes altas de la cuenca no se identificó un cambio significativo en cobertura por lo tanto los procesos en esos sectores, en las diferentes épocas obedecen más a las condiciones geológicas y geotécnicas, tales como depósitos poco consolidados con altas pendientes y un marcado contraste de rigidez y permeabilidad con el sustrato rocoso, lo que fomenta la concentración de esfuerzos en la base de estos materiales superficiales.
73. Los valores de erosividad de la lluvia R, obtenido de acuerdo con el modelo USLE da valores entre 52 y 190 (Ft *Ton)/ (Acre*Pulg) considerados válidos si se comparan con los obtenidos por medición directa en la cuenca del Río Tunjuelito. Se observa un aumento exponencial de la erosividad con el periodo de retorno de la lluvia, esto puede deberse al efecto combinado de una variación exponencial de la función de probabilidad utilizada y una relación exponencial entre la energía cinética y la intensidad de la lluvia.
74. Con relación al factor de erodabilidad del suelo, estos están entre 0.019 y 0.122. Observando las curvas propuestas por Weschmeier se puede concluir que este factor de erodabilidad es bajo.
75. Los valores del factor LS obtenidos, oscilan entre 0 y 165, sin embargo la mayoría de los datos son del orden de 20, lo que es un valor bajo.
76. Los valores de cobertura en la zona rural en general dieron muy bajos del orden de 0.013, lo que unido con la baja erodabilidad del suelo puede explicar la baja producción de sedimentos de la cuenca por procesos erosivos. En las zonas de cantera y en las zonas rurales los coeficientes de cobertura son muy altos, entre 0.5 y 1.0, generando una gran producción de sedimentos en esas zonas.
77. En una de las reuniones con la DPAAE, se mencionaron cuatro puntos que por sus particularidades geotécnicas ameritaban un análisis de estabilidad juicioso, estos fueron los puntos de análisis que sirvieron para evaluar los aportes por inestabilidad de laderas, pero no son los sitios críticos mencionados en la propuesta, que en ella hacían alusión a puntos de taponamiento del río, para este caso el único punto ubicado en la cuenca que podría categorizarse como *sitio crítico* es el ubicado aguas arriba de la entrega de la Quebrada La Pichosa (Aguas Claras).
78. Las profundidades de socavación local alcanzan valores entre 0.7 m y 2.10 m, que dadas las características geométricas de las bancas y los parámetros de resistencia son suficientes para hacer fallar las bancas. Esto explica el mayor aporte de sedimentos por este proceso que el de erosión superficial.

79. Los análisis de estabilidad confirmaron que el mecanismo de falla típico de las bancas de la quebrada son movimientos rotacionales, cuyos aportes de sedimentos a los potenciales flujos es importante, aunque no genere cambios significativos en la concentración del flujo.
80. De los análisis de estabilidad también se puede ver el significativo efecto de la socavación en el aumento de los volúmenes potencialmente fallados.
81. El análisis de estabilidad de las laderas define claramente como zonas potencialmente inestables el sector donde se localizan los Barrios Aguas Claras, Gran Colombia, Montecarlo y La Cecilia. Este resultado es coherente con las observaciones de campo y los antecedentes de la zona que muestran que es un sector con procesos de inestabilidad activos. Estos procesos están controlados por los bajos valores de los parámetros de resistencia de este depósito coluvial.
82. Igualmente se observa que la parte baja de las quebrada Upata, Laureles y Osa presentan zonas inestables, las cuales se principalmente al espesor y pendiente de ese sector. En estas quebradas, durante el inventario se identificaron deslizamientos en sus márgenes.
83. Los tiempos de concentración de la cuenca es del orden de 3 horas, lo que sugiere que la respuesta es muy rápida, de manera que el sistema de alerta debe estar basado en datos de lluvia y con registro automático.
84. La distribución espacial de las lluvias en la cuenca muestra que el nivel de precipitación anual aumenta con la altitud, variando entre 1000 y 1500 mm. Las precipitaciones diarias máximas registradas están entre 60 y 80 mm. La distribución temporal de la lluvia muestra un ligero aumento de la precipitación con respecto a la media en los últimos 10 años.
85. Los datos de la estación El Delirio, se ajustaron mejor a la distribución Log-Pearson Tipo III, y los datos de Vitelma a la distribución Pearson Tipo III.
86. Los valores máximos presentados en la estación El Delirio, van desde 4.42 m³/s en el mes de febrero que presenta normalmente valores bajos de precipitación, hasta 26.60 m³/s, en el mes de abril, que es un mes con pluviosidad por encima del promedio (Este valor de caudal máximo, se presentó en el año 1982). Los datos de caudal se ajustan a una función de probabilidad Log-Normal.
87. La modelación de los flujos a lo largo de las quebradas muestran que en el Río San Cristóbal el flujo se concentra a lo largo de su para todos los escenarios y no representa amenaza sobre la población ni las estructuras.

Por el contrario en las Quebradas La Pichosa, Ramajal, El Triangulo y Vitelma se observa que los flujos se desbordan de su cauce y afectan parte de los predios construidos en la zona de preservación.

88. Para los escenarios de análisis no se tuvo en cuenta la socavación del lecho ya que la dinámica observada en la cuenca está estrechamente relacionada con la geología de la zona que se encuentra dividida en tres grandes sectores, la parte alta de la cuenca conformada por un depósito coluvial matriz soportado (sector por el cual al paso del río se ha quitado la matriz y dejado al descubierto los grandes bloques que se encuentran en el cauce); un segundo sector donde aflora la roca (sector del batallón donde se presentan las velocidades más altas en la modelación) y el tercer sector donde se encuentra el abanico (sector de bajas velocidades).
89. Dado que el modelo FLO-2D presenta limitaciones para la simulación del comportamiento de flujos en conductos a gravedad o a presión, la simulación de las quebradas Ramajal y Vitelma parte del supuesto que el conducto por el cual esta quebrada es canalizada, se obstruye totalmente haciendo que el flujo se distribuya por toda la planicie y por las zonas urbanizadas. En términos generales, esta condición es extrema y se considera aceptable para los objetivos de esta investigación. Un análisis del comportamiento del flujo en los conductos, se debe realizar empleando otro tipo de programas que incorporen esta herramienta.
90. Con relación a los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones del flujo, para los diferentes escenarios planteados, dadas las características de alta pendiente en el cauce, las diferencias en los resultados de los diferentes escenarios, no presentaron cambios sustanciales, además también debido a que el aporte de material sólido por los diferentes procesos, no fue alta, y normalmente el flujo se consideró como un flujo de agua.
91. De acuerdo con los resultados que se han presentado en los distintos escenarios, donde se han presentado cambios en las concentraciones de sólidos dados los aportes de material sólido en cada una de las subcuencas, y adicionalmente en el análisis de sensibilidad que consideran concentraciones superiores a 0.25, no se encontró para el cauce del río San Cristóbal un cambio significativo en la hidráulica del mismo, y mucho menos una afectación considerable a las zonas de la parte baja urbanizadas. Es decir, para este cauce, los cambios en las concentraciones de sólidos no son significativamente relevantes.

92. De igual forma, y con respecto a la distribución temporal de las concentraciones de sólidos, para este cauce, tampoco se encontró una variación significativa en los resultados obtenidos al asumir concentraciones de sólidos con distribución temporal proporcional al hidrograma de caudal líquido o con distribución constante. Esto, tal vez debido a las características de alta pendiente en el cauce del río San Cristóbal.
93. En el caso de las Quebradas La Pichosa y El Triangulo debe adoptarse alguna medida de mitigación del riesgo. Históricamente en esas quebradas se han registrado inundaciones y flujos de escombros, que han incluso ocasionado muertes.
94. Al analizar las quebradas El Triangulo y La Pichosa con obras, en las cuales se consideró únicamente la canalización de estos cauce, fue posible observar que dichas obras mitigan la amenaza por inundación, en la medida que el flujo es totalmente conducido por dichas estructuras; esta situación en la cual el canal es capaz de conducir los volúmenes de estos flujos, fue tanteada hasta obtener una sección tal que el flujo no se desborde de la estructura.
95. Para la quebrada Vitelma es fundamental garantizar el funcionamiento de la tubería, que si se llega a taponar da la posibilidad de que se generalice la afectación económica y social del sector.
96. Para las cuencas analizadas la producción de sedimentos por los diferentes procesos no es suficiente para aumentar la concentración del flujo y bajo todos los escenarios estudiados el comportamiento era el de un flujo de agua. Esta característica no se puede generalizar. El hecho de que la cuenca en su parte alta sea una zona de reserva bien vegetalizada hace que la producción de sedimentos sea baja y no muestre diferencias significativas en los diferentes escenarios.
97. Los parámetros hidráulicos recomendados para hacer análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo es la profundidad de 0.1m y 1.0m, la primera permite definir las zonas inundables, mientras que la segunda marca el límite para el cual las estructuras reforzadas comienzan a experimentar daños menores, para esta profundidad las estructuras de mampostería y de madera experimentan daños moderados.
98. En la cuenca de la Quebrada San Cristóbal los caudales de grandes periodos de retorno son evacuados por el cauce adecuadamente. En la zona alta no se presentan ni alturas ni velocidades altas, en la zonas media y baja se presenta concentración del flujo a lo largo del cauce y en la

medida que aumentan los caudales se incrementan las alturas y velocidades.

99. En las quebradas La Pichosa, El Triángulo, Ramajal y Vitelma existe posibilidad de inundación y flujos pero de baja profundidad y velocidad. La zona de desborde sobrepasa la ZMPA y alcanza a afectar algunos predios que la invaden.
100. Para la quebrada La Pichosa el estudio de Gómez Cajiao recomienda una serie de acciones que muestran ser económicamente viables en términos de la reducción del riesgo económico. Aunque una canalización de esta quebrada puede ser económicamente mejor alternativa, la inestabilidad del terreno la hace menos viable técnicamente.
101. Para la quebrada El Triángulo una canalización muestra ser económicamente viable, sin embargo el mayor costo económico está relacionado con la inundación de zonas verdes y predios sin urbanizar, que no requerirían de este tipo de obra, sin embargo la canalización puede favorecer el flujo en la parte baja reduciendo la posibilidad de represamiento de la quebrada San Cristóbal a la entrega.
102. Los datos de población que se obtuvieron del censo del 2005 no son confiables para hacer completo el análisis de riesgo social. Se presenta en este estudio un estimativo de personas potencialmente afectadas en cada escenario con base en valores promedio de densidad de ocupación de los predios.

Recomendaciones

1. Colocación y lectura de miras para tratar de establecer relaciones con la del Delirio y con ellos poder establecer planes de seguimiento de los niveles del río. Se puede involucrar a la comunidad para que se tomen las lecturas en los puentes y posiblemente en otros lugares importantes para el análisis de la información.
2. Instrumentación de la zona inestable de Aguas Claras, Montecarlo y La Gran Colombia para definir niveles de lluvia críticos.
3. Establecer los sistemas de alcantarillado pluvial y de aguas servidas con el fin de reducir los volúmenes de agua de infiltración.

4. Generar procedimientos para la elaboración de mapas de Geología para Ingeniería y de Geomorfología.
5. Proponer campañas de limpieza de las quebradas con la colaboración de la comunidad.
6. Reubicar los predios que están siendo afectados por inundaciones y flujos localizados dentro de la zona protección ambiental, los cuales se han visto afectados en el pasado por procesos de inundación y flujo de escombros.
7. Proponer planes y actividades que permitan una mejor concientización de la población en términos de reducir las rencillas que se generan entre los diferentes barrios. Se han identificado serios problemas entre una comunidad y otra.
8. Para la determinación de la vulnerabilidad física de edificaciones, se requiere de experimentos a escala natural en estructuras en donde se identifiquen los diferentes niveles de daño asociados con diferentes derivas o de la recopilación de bases de datos que incluyan niveles de flujo con la cuantificación de los daños generados durante eventos pasados.
9. Para la definición de la vulnerabilidad física de las personas se requiere de la compilación de bases de datos para determinar los niveles de flujo asociados con casos de pérdidas de vidas humanas.
10. Se deben establecer lineamientos generales para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, con el fin de unificar la forma de presentación de sus resultados, de manera que los diferentes estudios sean comparables y complementarios.
11. Si las institucionales nacionales y distritales están interesadas en que los estudios de riesgo se hagan de manera cuantitativa, se debe hacer un análisis de los criterios de riesgo aceptable y tolerable, de manera que se puedan definir límites que reflejen la realidad nacional y sean aplicables en la práctica.
12. Se debe solicitar en los términos de referencia de los estudios de amenaza y riesgo, el análisis, en términos de beneficio costo, de diferentes alternativas de mitigación, no sólo las estructurales, máxime cuando nos vemos enfrentados a una importante escasez de recursos para la implementación de medidas estructurales.
13. Se requieren planes de capacitación a los diferentes especialistas que participan de análisis de riesgo, es necesario que todos ellos conozcan el

marco conceptual de las estrategias de manejo del riesgo y del marco conceptual que domina los estudios. El desconocimiento de los métodos de análisis hace que los resultados parciales de los estudios se vana desconectados en relación al objetivo de estudio.

14. Se debe investigar en la determinación de vulnerabilidad física, tanto de estructuras como de personas, para darle mayor objetividad a los estudios de riesgo.
15. Con el fin de mejorar los resultados de los estudios de riesgo, en particular lo que tienen que ver con la vulnerabilidad física se debe revisar la información obtenida en el censo de 2005. La información suministrada por el DANE no permite que los análisis de vulnerabilidad sean aplicables a escalas a nivel de barrio o manzana.
16. Se debe establecer un marco metodológico unificado para la elaboración de mapas de Geología para Ingeniería y Geomorfología. Los mapas de Geología no se enfocan a un método de análisis y marco conceptual claro, de manera que termina siendo mapas de geología regional sin un objetivo específico. En este caso es aconsejable que los mapas estén asociados con algún método de evaluación o caracterización geotécnica, por ejemplo el GSI.

En relación con la geomorfología se debe definir un sistema de clasificación y solicitar que los mapas de geomorfología se basen en él, para poderlos comparar y complementar. En este sentido los mapas no pasan de ser la identificación de unas unidades que no representan de ninguna forma su influencia en el análisis de amenaza del cual hace parte. Existen dos tendencias con relación a los mapas de geomorfología, una de mirar los paisajes resultantes (por ejemplo Villota), y otra la de mirar los procesos que los generaron (por ejemplo el ITC), para la aplicación en ingeniería, el segundo tipo de mapas es más aconsejable.

17. Se debe tratar de implementar la modelación física de los procesos hidrológicos, tales como la infiltración y escorrentía con el fin de reducir el grado de incertidumbre en los valores de lluvia efectiva y caudales con que se hace la modelación de los procesos dentro de la cuenca.
18. Antes de continuar con la aplicación de las técnicas de trazadores para estimación de caudales se debe hacer una validación juiciosa de su aplicabilidad.
19. La topografía para el estudio de amenaza y riesgo a nivel de cuencas debe tener una escala mínimo de 1:5000. En lo posible debe hacerse una

topografía exclusiva para el objeto de estudio y no la combinación de mapas como se hizo en el presente trabajo.

20. Las imágenes de satélite son una herramienta muy útil para la identificación de rasgos geológicos, geomorfológicos, y coberturas, sin embargo los métodos de procesamiento de imágenes no son muy conocidos y los resultados requieren de una juiciosa validación de campo.
21. Se debe implementar en el plan de acción el monitoreo del comportamiento de la quebrada con la lectura de las miras que hay en los puentes que atraviesa.
22. Establecer un formato único de inventario de deslizamientos. A pesar que el formato propuesto por INGEOMINAS y utilizado en este trabajo, la experiencia muestra grandes inconvenientes en el diligenciamiento de dicho formato, lo que le hace perder aplicabilidad. Es claro que el formato de INGEOMINAS busca obtener información completa con relación a los procesos, sin embargo mucha de esa información debe ser obtenida en oficina o de fuentes secundarias. Se debe pensar en un formato de campo que se limite a la información que se requiere en campo. Por otra parte un formato de estos debería estar asociado con un método de análisis de amenaza y riesgo, sino mucha de la información recolectada no es útil para el objeto específico de un estudio de riesgo.
23. Se debe unificar la metodología para la tipificación y valoración de predios, infraestructura, viviendas, etc. En un análisis cuantitativo de riesgo en que se basan las decisiones, el costo de los elementos expuesto debe determinarse de la mejor forma posible para que la evaluación del riesgo conduzca a conclusiones acertadas.
24. Se recomienda implementar métodos de evaluación de vulnerabilidad de líneas vitales y métodos de la cuantificación de los costos por daños en esas estructuras.
25. Es necesario estudiar los factores de producción de sedimentos en cuencas de alta pendiente para determinar los sedimentos producidos por erosión y por deslizamientos en eventos de corta duración pero de gran intensidad.
26. Utilizar como magnitudes de análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para inundaciones y flujos de detritos profundidades de flujo de 0.1 m y 1.0 m, el primero permite analizar las zonas de inundación y el segundo marca un límite en donde se evidencian daños importantes en las estructuras.

-
27. Para poder incluir en los estudios de riesgo los efectos sobre líneas vitales se debe investigar en la definición de la vulnerabilidad de este tipo de estructuras y en una metodología que permita cuantificar sus costos.
28. Los análisis Beneficio/Costo para la reducción del Riesgo en las quebradas La Pichosa y El Triángulo indican que la canalización es favorable desde el punto de vista económico pero desde el punto de vista técnico no se garantiza su funcionamiento por estar en una zona inestable.

CAPITULO 11

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AFPS. (1995) Guidelines for Seismic Microzonation Studies. French Association for Earthquake Engineering. pp. 7-11.

- [2] Alvarado, B. 1944. Informe sobre algunas explotaciones de piedra en la ribera occidental del San Cristóbal. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.

- [3] Anderson, J., Bertero, V. (1987). "Uncertainties in establishing design earthquakes". Journal of Structural Engineering. Volume 13. No. 8. Pp 1709-1724

- [4] ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA. AIS. (1998). Norma Sismo Resistente 1998. Bogotá.

- [5] B & C, Cia, Ltda. (1999). Estudio histórico de desastres en Santa Fé de Bogotá en el Quinquenio 1994-1998.

- [6] Barroca, B., Bernardaza, P., Mouchel, J.M., Hubert, G. (2006). Indicators for identifying of urban flooding vulnerability. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 553-561.

-
- [7] Benedetti, D., Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione. L'Industria della costruzioni. No.149. Roma. Italia.
- [8] Birkmann, J. (2006a). Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [9] Birkmann, J. (2006b). Indicators and criteria for measuring vulnerability: Theoretical bases and requirements. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [10] Bollin, Chistina., Hidajat, Ria. (2006). Community-based risk index: pilot implementation in Indonesia. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [11] Bonett Díaz, Ricardo León. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. España, Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [12] Campos García, Ana. (1991). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y del escenario de pérdidas como consecuencia de un terremoto interno en la ciudad de Pereira. Bogotá. Trabajo de grado (Maestría). UNIANDES.
- [13] Campos A. et al. (2000). Informe final vulnerabilidad física. Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Pereira.

-
- [14] Cardona Arboleda O.D. (1991). Sistemas de alerta para la prevención de desastres. Colombia.
- [15] Cartier G., Delmas P. (1984). Les mecanismes des mouvements de terrain: necessite de la mesure des déplacements – Colloque de Caen. Mémoire du BRGM. N° 83, pp. 338-344.
- [16] Chow, V., T., Mays, L., W., Maidment, D., R., (1994). “Hidrología Aplicada”, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá.
- [17] Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2001). Inestabilidad de laderas. Secretaría de Gobernación. México.
- [18] Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (2002). Informes Técnicos: Sistemas de Alerta Hidrometeorológica en Acapulco, Tijuana, Motozintla, Tapachula y Monterrey. Coordinaciones de Investigación e Instrumentación. México.
- [19] CEPAL - BID. (2000). Un tema del desarrollo: La reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres. México.
- [20] Clements, T. 1927. La Falla de Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- [21] Coburn, A., Spence R.J. y Pomonis A. (1991). Vulnerabilidad y evaluación del riesgo. PNUD/UNDRO. Cambridge.

- [22] Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2002). Diagnóstico situacional de las comunidades aledañas al cerro Tapezco: Proyecto Sistema de Alerta Temprana en el cerro Tapezco. San José, Costa Rica.
- [23] Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) (1995). Guía operacional del sistema de alerta de inundaciones – Cuenca del Río Leán. Tegucigalpa, Honduras.
- [24] Compañía de Estudios e Interventorías - CEI Ltda., "Saneamiento Ambiental y Control de Crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo" Volumen de Sedimentología", Bogotá, 1997.
- [25] Corsanego, A. Petrini, V. (1990). "Seismic vulnerability of buildings". Proceeding of the SEISMED 3. Trieste. Italy.
- [26] CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR. Plan de manejo de la reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá. Documento principal. 2006
- [27] CORPORACION SUNA HISCA. Fisiografía - Parque Ecológico Distrital de Montaña Entrenubes. 2006
- [28] Cruden. David M. y Varnes David J., Landslides Types and Processes. En Landslides, Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board. National Research Council, pp36 – 76, 1996.
- [29] Cutter, Susan L. (2001). "The Changing Nature of Risks and Hazards." Chapter 1, in American Hazardscapes: The Regionalization of Hazards and Disasters. Washington, DC. Joseph Henry Press.

- [30] DAMA – Fierro, J. 2004. Seguimiento y control del componente geotécnico de la industria extractiva en el Distrito Capital. Informe interno. Bogotá.
- [31] Da Porta, J. 1974. Léxico Estratigráfico Internacional – Terciario y Cuaternario.
- [32] Defensa Civil. Programa de Organización Barrial ante Emergencias ALERTA. (1999). Meteorología: Fenómenos naturales. Argentina.
- [33] Delmas P, et al. (1987). Méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain. Labo. Des Points et Chaussées, N°. 150-151. Spécial Risques Naturels, pp. 29-38.
- [34] Diaz-Granados, M.A., Ordoñez, J.I., Deeb, A.M., "Determinación de coeficientes de producción de sedimentos en cuencas extensas", Memorias XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Sao Paulo, Brasil, Agosto, 1986.
- [35] Dirección Nacional de Protección Civil. Sistema de Alerta Temprana. Ministerio del Interior. República Argentina.
- [36] Dimaté, C., Taboada, A., Rivera, L. y D. Giardini. Seismotectonics on the Central Region of the Colombian Eastern Cordillera.
www.chile.ird.fr/pdf/isagPDF/dimate.pdf

- [37] DPAE – Hidrogeología y geotecnia ambiental. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa, diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio San Cristóbal sur (Localidad de San Cristóbal)
- [38] DPAE – Hidroconsulta, 2000. Estudio de zonificación de amenaza por inundación del río Fucha en las localidades de San Cristóbal, Kennedy y Fontibón y recomendaciones de medidas de mitigación.
- [39] Dolce M. (1994). Report of the EAEE working group 3: vulnerability and risk analysis. Rotterdam. Balkema. Proceedings of the 10th ECEE. Viena. Austria.
- [40] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Ingeniería y Recursos Hídricos Ltda., (1995), “Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá, Informe General”, Bogotá D.C.
- [41] EWC III. Tercera Conferencia Internacional Sobre Alerta Temprana. (2006). Desarrollo de sistemas de alerta temprana: Listas de comprobación. Bonn, Alemania. Disponible en Internet <http://www.unisdr.org/ppew/info-resources/ewc3/checklist/Spanish.pdf>
- [42] Giraldo, R., William, (1998). “Avalúos Metodologías Prácticas”.
- [43] GNDT (1990). “Rischio sismico di edifici pubblici”. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. – Aspetti Metodologici. Appendice 1.- Rilevamento dell’esposizione e vulnerabilità sismica degli edifici. Appendice 2.- Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura. Appendice 3.- Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in cemento armato.

-
- [44] Grünthal, G. (1998). "European Macroseismic Scale 1998. EMS-98". Conseil de L'Europe. Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15.
- [45] Hamilton R. (1997). Report on early warning capabilities for geological hazards. Geneva.
- [46] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. 1988. Resolución 2555 de septiembre 28 de 1988.
- [47] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI. Bases conceptuales y guía metodológica para la formulación del plan de ordenamiento territorial departamental. Santafé de Bogotá: IGAC. Subdirección de Geografía. 350 p. 1997.
- [48] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI - MINAMBIENTE. Uso actual de las tierras de la reserva forestal bosque oriental de Bogotá. Bogotá: IGAC. Subdirección de Agrología. 2004.
- [49] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI - MINAMBIENTE. Cobertura vegetal de las tierras de la reserva forestal bosque oriental de Bogotá. Bogotá: IGAC. Subdirección de Agrología. 2004.
- [50] INGEOMINAS. 1988. Zonificación geotécnica de Bogotá. Informe interno.
- [51] INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. Análisis de los sistemas de clasificación propuestos para la vegetación de México. Disponible en Internet <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/421/cap3.html>. [Consultada: 05/03/2007]

- [52] Jiménez Jara, Diana Yolima. (2005). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones de uno y dos pisos ante desplazamientos inducidos por sismo en suelos volcánicos del eje cafetero. Bogotá. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.
- [53] Julivert, M. 1962. Estudio sedimentológico de la parte alta de la Formación Guadalupe al Este de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 10. Bucaramanga, Colombia.
- [54] Julivert, M. 1963a. Estratigrafía y sedimentología de la parte inferior de la Formación Guaduas al sur de la Sabana de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 12. Bucaramanga, Colombia.
- [55] Julivert, M. 1963b. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 13 y 14. Bucaramanga, Colombia.
- [56] Jurg Kaufmann, Daniel Steudler. 1998. Comisión 7 de la FIG. CATASTRO 2014. Una visión para un sistema catastral futuro.
- [57] Kelman, Ilan. (2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England. Trabajo de grado (PhD). University of Cambridge, U.K.
- [58] Krong, Wolfgang. (2002). Keynote lecture: Flood risk = hazard x exposure x vulnerability. Flood defence, 2002.
- [59] Laporte Molina G., Sáenz Aguilar S. (1992) Estudio geotécnico: propuestas para reducción del riesgo y sistema de control. San José; costa Rica.

- [60] Leone F., Aste J.P. y Velásquez E. (1995). Contribution des constants d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain. Bull Assoc. Gogr. Franç. N°. 4, pp. 350-371.
- [61] Leone Frédéric. (1996). Concept de vulnérabilité applique a l'évaluation des risques gènères par les phénomènes de mouvements de terrain. France. Université Joseph Fourier Grenoble I Sciences, Techniques et Médecine.
- [62] Loboguerrero A. 2005. La Falla de Bogotá. Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.
- [63] MALLEUX J. Evaluación integral de los recursos forestales. Clasificación del uso de la tierra. Disponible en Internet.
http://redinfor.lamolina.edu.pe/Seminario_Ev_Integral/CAP-II%20SemEvRRFF.pdf.
[Consultada: 09/04/2007]
- [64] Maskrey, Andrew. (1994). Community based flood hazard in squatter settlements: Experiences in the Rimao Valley, Peru. Nueva Delhi, India.
- [65] Messner, F., Meyer V. (2005). Flood damage, vulnerability and risk perception-challenges for flood damage research.
- [66] Monsalve, G., (1999). "Hidrología en la Ingeniería", Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C.
- [67] Mustafa, Daanish. (2003). Reinforcing vulnerability? Disaster relief, recovery, and response to the 2001 flood in Rawalpindi, Pakistan. 2004 Elsevier Ltd.

- [68] O.D.I.C. (1995). Mapa histórico de desastres en la expansión urbana de Santafé de Bogotá, 1943-1993.
- [69] OEA. Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; Gobierno de Irlanda. (2001). Manual para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana de inundaciones en cuencas menores. Washington, D.C.
- [70] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2003. Agricultural land use: definition of land use. Disponible en Internet <http://www.fao.org/sd/eidirect/land/EPre0081.htm> [Consultada: 05/03/2007]
- [71] Park, Y., Ang, A., Wen, Y. (1984). "Seismic damage analysis and damage-limiting design of R/C building". Civil Engineering Studies. Technical Report No. SRS 516, University of Illinois, Urbana. USA.
- [72] Park, Y., Ang, A., Wen, Y. (1986). "Damage-limiting aseismic design of building". Earthquake Spectra. May.
- [73] Paris, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. 2000. Map and Database Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. Open-File report 00-0284. United States Geological Survey.
- [74] Parra, H. y Royo y Gómez, J. 1942. Informe sobre las explotaciones rocosas del Municipio de Bogotá. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- [75] Pérez, G y A. Salazar, 1973. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Geología Colombiana No. 10. Bogotá.

-
- [76] Proaño López F. (2001). Monitoreo hidrometeorológico de los cerros sur orientales de Bogotá D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE. Bogotá, Colombia.
- [77] Protti M. (1999). Alerta temprana a San José por un debajo de la península de Nicoya. San José, Costa Rica.
- [78] Queste, A., Lauwe, P. (2006). User needs: why we need indicators. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [79] Reid B. (2006). Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. UN-ISDR Plattform for the Promotion of Early Warning (PPEW). Bonn, Germany.
- [80] Renaud, F.G. (2006). Environmental components of vulnerability. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [81] Rivera J.A. Utilización de sistemas de alarmas y comunicaciones en emergencias: Guía del líder comunitario. Tolima, Colombia.
- [82] Roca Salazar R., Fernández Ríos D., Gutiérrez Guillén R. (2003). Sistema de Alerta Temprana contra las crecidas del Río Grande (SALTEM-RG). La Paz, Bolivia
- [83] Royo y Gómez, J., 1941. Las explotaciones de materiales rocosos y el ornato y la seguridad de Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.

- [84] Salgado D. (2002). Problemática de la cuenca del río Reventado Cartago: Los aspectos de ocupación en área de amenaza natural múltiple y los conflictos del uso del suelo en áreas con regulaciones preventivas. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. San José; Costa Rica.
- [85] Sánchez Silva, Edgar Mauricio. (1992). Metodología para la evaluación de vulnerabilidad sísmica de centros urbanos. Santa Fe de Bogotá. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). UNIANDES.
- [86] Safina Melone, Salvador. (2003). Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico. España, Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cataluña
- [87] Schneiderbauer, S., Ehrlich, D. (2006). Social levels and hazard (in)dependence in determining vulnerability. In: Birkmann (Ed). Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.
- [88] SECRETARIA DE HACIENDA DISTRITAL. Metodología Imposición IVIUR.
- [89] Simeon Institute. (1998). Penultimate Glossary of Emergency Management Terms. Claremont, CA. <http://www.cyberg8t.com/simeon/glossary.html>.
- [90] Stutzer, O. 1920. Acerca de algunos rastros de glaciación diluvial en la cordillera próxima a Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- [91] Teran, G.A. (1997). "Energy concepts and damage indices". <http://nisee.berkeley.edu/lessons/general.html>.

- [92] Ujueta, G. 1961. Geología del Noreste de Bogotá, Boletín del Servicio Geológico Nacional, vol IX. Bogotá.
- [93] UNIANDES. (1999). Estudio de Microzonificación Sísmica para orientar la reconstrucción de Armenia-Quindío.
- [94] UNIANDES. (2002). Informe Final Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales. Bogotá.
- [95] UNIDAD ADMINISTRATIVA DE CATASTRO DISTRITAL. 2006. Manual de Actualización Catastral
- [96] United Nations, Educational, Scientific and Cultural Organizations (UNESCO), (1979), Annual summaries of information on natural disasters, 1971-1975: Paris, United Nations, Educational, Scientific and Cultural Organizations.
- [97] UPES – Ingeocim, 1998a. Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafé de Bogotá. Bogotá.
- [98] UPES – Ingeocim, 1998b. Estudios y diseños de estabilidad geotécnica, control de erosión y manejo de aguas para la estabilidad de taludes. Informe de diagnóstico Sitio El Rocío (Localidad de San Cristóbal). Bogotá.
- [99] U. S. Army Corps Engineers, (2000). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS” Technical Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, Massachusetts.

- [100] Van der Hammen, T. 1995. Plioceno y Pleistoceno del Altiplano de Bogotá. Análisis Geográfico No. 24. Publicación IGAC. Bogotá.
- [101] Van Wijngaarden, Willem. Elaboración de mapas y clasificación. p. 9-22. En: I Taller de Cobertura Vegetal (1994: Bogotá, Colombia). Memorias. Santafé de Bogotá: IGAC. (Proyecto SIG PAFC-Universidad Javeriana). 1994.
- [102] Vargas, C. y T. Durán. 2005. State of strain and stress in northwestern of South America. Earth Science Research Journal Vol. 9 (1).
- [103] Vargas, E. Análisis y clasificación del uso y cobertura de la tierra con interpretación de imágenes de satélite. Bogotá: IGAC-CIAF. p. 8-45. 1992.
- [104] Vargas, G. 1999. Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Proyecto Río Guatiquía. Villavicencio.
- [105] Vergara, H., Taboada, A., Romero, J., Castro, E. y Paris, G. 1996. Actividad neotectónica de las principales fuentes sismogénicas de la región central de Colombia. Memorias V Congreso Colombiano de Geología.
- [106] Villagrán de León J. C. La alerta temprana en el contexto de las poblaciones rurales, contrastes entre las erupciones y las inundaciones en Guatemala. Guatemala.
- [107] Villagrán de León J.C. SATs Sistemas de alerta temprana para emergencia de inundaciones en Centroamérica. Panamá.

- [108] Villagrán de León J.C. Sistemas de alerta temprana operados por comunidades en América Central. Guatemala. Disponible en Internet <http://www.unisdr.org/ppew/info-resources/ewc3/checklist/Spanish.pdf>
- [109] Villagrán de León J. C. (2001). Sistema comunitario de alerta temprana para inundaciones: Proyecto MARLAH: Cara Sucia, Ahuachapán, El Salvador. El Salvador.
- [110] Villagrán de León J.C., Scott J., Cárdenas C., Stacey T. (2003). Sistema de Alerta Temprana en el hemisferio americano: Contexto, Estado actual y Perspectivas futuras. Antigua, GT.
- [111] Villota, H. 1991. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Publicación IGAC. Bogotá.
- [112] Villota, H. El Sistema CIAF de Clasificación Fisiográfica del Terreno. En: Revista CIAF, 1992, Vol. 13, No. 1, pp. 55 – 70.
- [113] Yohe, G., Tol, R.S.J. (2002). Indicators for social and economic coping capacity-moving toward a working definition of adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 12, 25-40.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

Como fuentes de información de antecedentes de procesos de inestabilidad, inundación y flujos en la cuenca del Río San Cristóbal se identificaron y analizaron informes, estudios y conceptos emitidos o contratados por las diferentes entidades distritales que tienen influencia sobre la zona de estudio. Los resultados del análisis de esta información se dividió en dos, a saber: por una parte se compiló información relacionada con eventos pasados en la zona y en segundo lugar se analizaron los informes y estudios.

2.1 Antecedentes de procesos

Los antecedentes sobre procesos dentro de la zona de estudio se identificaron a partir de la información contenida en el SIRE de la DPAE. En la Tabla 2-1. se resume la principal información obtenida para dichos casos. La localización de los sitios y zonas relacionados con cada documento se muestra en la Figura 2-1.

Como Se puede ver en la Tabla 2-1., los antecedentes en la zona de estudio se relacionan con los conceptos dados o contratados por la DPAE para la legalización de los diferentes barrios. Como se aprecia en la tabla los problemas identificados son procesos de inestabilidad. A pesar de que a través de la comunidad y de algunos informes antecedentes se ha identificado, en la zona, la posibilidad de ocurrencia de procesos de inundación y flujos.

Es importante también resaltar que los conceptos técnicos se han concentrado a la evaluación de la amenaza por movimientos en masa y la estimación del riesgo en términos cualitativos, en la mayoría de los casos aplicando métodos y técnicas sin evaluar su aplicabilidad en términos de escala de aplicación, un ejemplo claro de esto es la utilización del método SES a zonas pequeñas, cuando el método fue desarrollado para escala 1:25.000.

Otro aspecto importante de destacar es como en la mayoría de los conceptos se recomienda la mitigación del riesgo a través de la construcción de obras dejando de lado una estrategia general como el manejo de las microcuencas y sin considerar los sistemas de alerta como una alternativa.

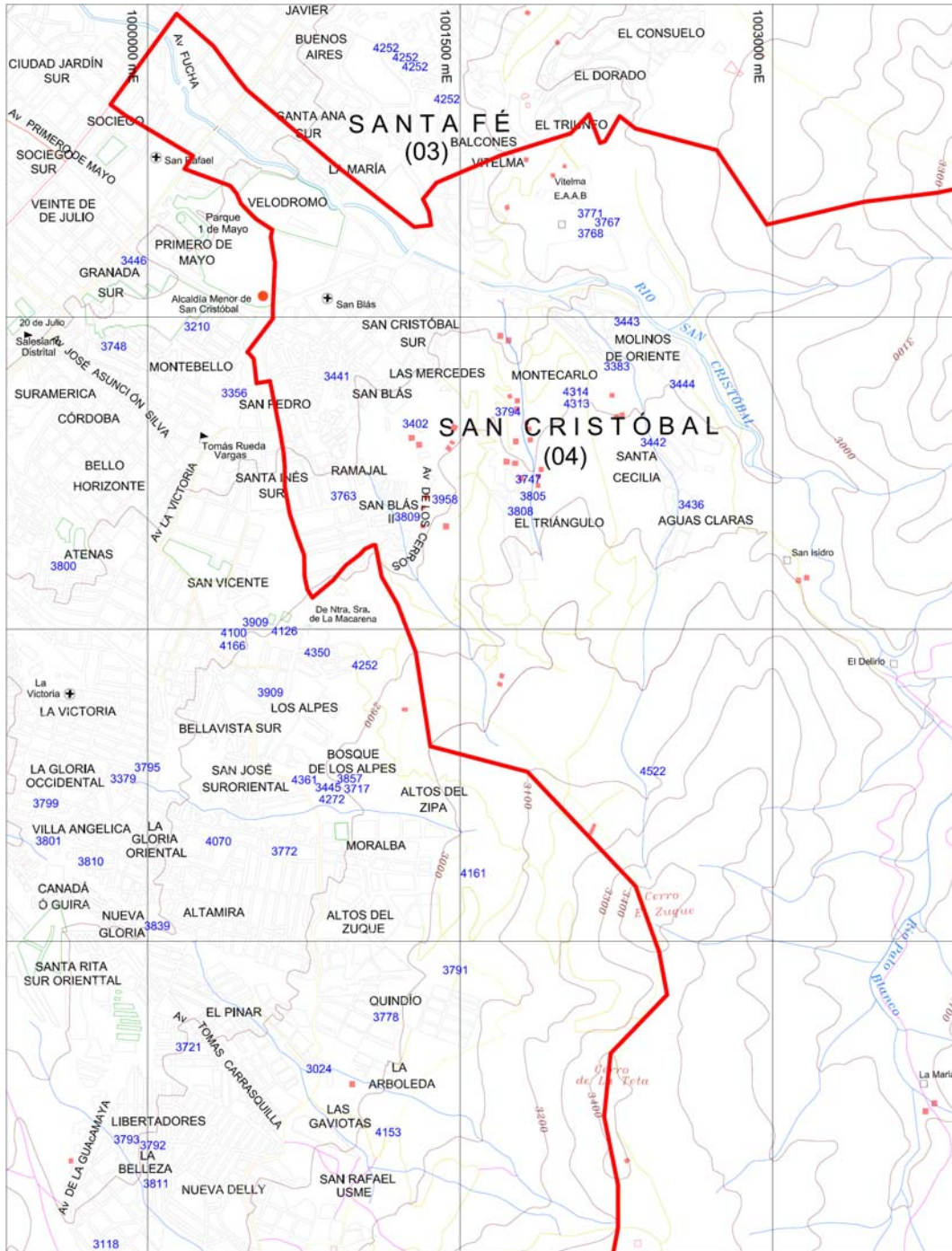


Figura 2-1. Localización de los conceptos técnicos reportados en el SIRE dentro de la zona de estudio. Los números corresponden al consecutivo dado por la DPAE y son los mismos que aparecen en la Tabla 2-1.

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 4314	TRIÁNGULO ALTO	5/4/2006	CT-3121;CT-3747; RO-09307; RO-09328; RO-09462; RO-9912; RO-11098; RO-11415; RO-11982; RO-13688; RO-15531; DI-2332; DI-2537	Zonificación geotécnica, análisis de estabilidad, Montecarlo y PEM	Leone, Soler	Mayor peso a la amenaza, IRG	Legalizar el desarrollo excluyendo predios en zona de amenaza alta Iniciar trámite de reasentamiento para 6 viviendas Continuar trámite de reasentamiento para 18 viviendas Incorporar predios desocupados como espacio público Implementar obras de infraestructura
CT 4313	TRIÁNGULO	12/13/2005	CT-3123; DI-586; DI-587; DI-588; DI-740; DI-855; DI-941; DI-886; DI-932; DI-973; RO-06604	Zonificación geotécnica, análisis de estabilidad, Montecarlo y PEM		Mayor peso a la amenaza, IRG	Legalizar el desarrollo excluyendo predios en zona de amenaza alta Iniciar trámite de reasentamiento para 6 viviendas Continuar trámite de reasentamiento para 18 viviendas Incorporar predios desocupados como espacio público Implementar obras de infraestructura Monitorear manzana 4 recuperar ronda de q. el Triángulo Efectuar estudios de suelos

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3958	CORINTO	1/15/2004	CT 673; CT 1471; CT 1472; CT 1473; DI 563; DI 586	Cortes sin reconfiguración, aguas servidas, excavaciones, asociados a ausencia de obras de drenaje	Deficiente calidad constructiva en material de recuperación, con vulnerabilidad global alta	Se considera factible la legalización, exceptuando predios en riesgo	Legalizar el desarrollo excluyendo predios en zona de amenaza alta Adelantar estudios para obras en zona de amenaza media Adelantar programa de reasentamiento para 3 viviendas Demoler 3 viviendas recuperar ronda de q. el Triángulo
CT 3809	MANANTIAL	10/1/2002		Cortes sin reconfiguración, aguas servidas, excavaciones, asociados a ausencia de obras de drenaje	Mayor en viviendas de recuperación y menor en mampostería	Media a alta probabilidad de falla laderas	Incluir en el programa de reubicación a siete familias Demoler y retirar escombros Implementación de obras de drenaje y reforestación declaración de zonas de alto riesgo no mitigable
CT 3808	TRIÁNGULO	10/1/2002	DG-855; DG-586; E-434; E-320 a 327	Cortes sin reconfiguración, aguas servidas, excavaciones, asociados a ausencia de obras de drenaje. Procesos de remoción en masa	Vulnerabilidad física, de grado alto. Barrio poco consolidado, en su mayoría viviendas de un piso en mampostería rústica	Media a alta probabilidad de falla laderas	Incluir en el programa de reubicación a veintidós familias demoler y retirar escombros implementación de obras de drenaje y reforestación declaración de zonas de alto riesgo no mitigable

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3805	CORINTO	10/1/2002	CT-3747; DG-1306; DG-586; DG-563; E-320 a 327; E-434	Amenaza por remoción en masa	Vulnerabilidad física, de grado alto. En los extremos y parte alta del barrios se encuentran viviendas expuestas a solicitudes		Incluir en el programa de reubicación a once familias demoler y retirar escombros implementación de obras de drenaje y reforestación declaración de zonas de alto riesgo no mitigable
CT 3794	AMAPOLAS	10/1/2002	E-320 a 327	Amenaza alta por remoción en masa	Barrio consolidado, con casa en mampostería rústica, en zonas deprimidas y bordeando la quebrada San Miguel	Suelos con media a alta probabilidad de falla	Incluir en el programa de reubicación a tres familias
CT 3771	MANILA	9/2/2002	CT-3123; CT-3383; E-320 a 327; E-303	Remoción en masa, asociada a la ausencia de obras de drenaje	35% de viviendas tipo tugurios y el resto en mampostería o prefabricadas. Vulnerabilidad física alta	Suelos con media a alta probabilidad de falla	Incluir en el programa de reubicación a veintinueve familias demoler y retirar escombros seguimiento de viviendas para ver afectación

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3768	GRAN COLOMBIA	9/1/2002	CT-3123; CT-3443; E-320 a 327; E-303	Remoción en masa (reptamientos y fallas rotacionales retrogresivas), asociada a la ausencia de obras de drenaje	Casa en mampostería rústica de un piso y tuguriales (10%) en la margen del río, Vulnerabilidad física alta	Suelos con media a alta probabilidad de falla y desestabilización de la ladera por el efecto del río en la pata de la ladera	Definición de zonas en riesgo no mitigable incluir en el programa de reubicación a veintinueve familias demoler y retirar escombros implementar obras de drenaje y reforestación para manejo de escorrentía monitoreo de viviendas
CT 3767	LAURELES	9/1/2002	CT-3143; CT-3444; E-320 a 327; E-400	Remoción en masa (reptamientos, deslizamientos rotacionales y flujos), se relacionan los procesos con la amenaza potencial que afecta la estabilidad de la ladera	Vulnerabilidad física alta, viviendas en mampostería rústica un piso 67%	media a alta probabilidad de falla laderas	Incluir en el programa de reubicación a cinco familias demoler y retirar material implementar obras de drenaje 4 viviendas en zona de alto riesgo no mitigable
CT 3763	RAMAJAL	9/1/2002	CT-2674; E-320 a 327; E-384	Remoción en masa,	vulnerabilidad alta de las viviendas en mampostería en los extremos de las manzanas 31 %, presentan alta vulnerabilidad física	suelos con media a alta probabilidad de falla	Incluir en el programa de reubicación a 30 familias demoler y retirar material implementar obras de drenaje

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3747	CORINTO	4/1/2002	CT- 673; CT-1471; CT-1472; CT-1473; DG -563; DG- 586; DG-740; DG - 932; DG - 587; DG - 588; DG - 855; DG - 886; DG - 941; DG - 973	Procesos de remoción en masas	Vulnerabilidad física intermedia por exposición y tipología	Los principales escenarios de riesgo coinciden con las zonas de amenaza alta. Es mitigable pero requiere gran inversión	Incluir en el programa de reubicación a 84 familias
CT 3444	LAURELES	11/4/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	Aspectos físicos como socioeconómicos o IPG	IRG, como probabilidad de ocurrencia del evento, con el índice de pérdidas potenciales	Adelantar estudios ejecución de obras de estabilización Ejecución de obras de infraestructura
CT 3443	GRAN COLOMBIA	11/4/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	aspectos físicos como socioeconómicos o IPG	IRG, como probabilidad de ocurrencia del evento, con el índice de pérdidas potenciales	Ejecución de obras de estabilización ejecución de obras de infraestructura Incorporación de acciones de ordenamiento y uso de suelo

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3442	LA CECILIA	11/4/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	Aspectos físicos como socioeconómicos IPG	IRG, como probabilidad de ocurrencia del evento, con el índice de pérdidas potenciales	Acometer obras de drenaje Implementar medidas físicas para el control de la amenaza
CT 3441	RINCON DE SAN CRISTOBAL	11/4/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	Aspectos físicos como socioeconómicos IPG	IRG, la totalidad del barrio se clasifica como sector en riesgo bajo por remoción en masa	Ejecución de obras de infraestructura (vías)
CT 3436	AGUAS CLARAS	11/4/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	Aspectos físicos como socioeconómicos IPG	Zona de riesgo bajo por remoción en masa: Corresponde a la mayor parte del barrio	Ejecución de obras de infraestructura, (acueducto y alcantarillado) Acciones de ordenamiento y uso de del suelo como prevención y recuperación del cuerpo de agua, márgenes y cauce

IDENTIFICADOR	BARRIO	FECHA	ANTECEDENTES	METODOLOGÍA Y/O APRECIACIÓN			OBSERVACIONES
				AMENAZA	VULNERABILIDAD	RIESGO	
CT 3402	AMAPOLAS	8/19/1999		Sistema Semicuantitativo de Evaluación de Estabilidad (SES) y la Metodología de Taludes Naturales (MTN)	Para su evaluación se tuvo en cuenta tanto los aspectos físicos de las viviendas como las Características socioculturales de la población. IPG		Ejecución de obras de infraestructura, (acueducto y alcantarillado) Acciones de ordenamiento y uso de del suelo como prevención y recuperación del cuerpo de agua, márgenes y cauce

Tabla 2-1. Conceptos técnicos recopilados en el SIRE, ubicados en la zona de estudio.

2.2 Estudios anteriores

A través de la búsqueda de los documentos relacionados con la zona de estudio se identificaron varios estudios relacionados con la zonificación y análisis de los procesos que se han presentado en el sector.

La fuente de estos estudios son los centros de documentación, bibliotecas y sistemas de información de las diferentes entidades del distrito. Se debe destacar aquí que no siempre fue fácil, una vez identificado el documento y su localización, acceder a ellos por un lado debido a los trámites administrativos y por otro el extraño ambiente de confidencialidad de documentos públicos. Se debe recordar en este sentido que una de las estrategias para mitigación del riesgo contemplada por Planeación Nacional está el fortalecimiento de los sistemas de información para que los organismos que lo necesiten los puedan consultar y utilizar sin inconvenientes.

Debido a la amplia zona de reserva presente en la cuenca y su influencia directa en la respuesta ante procesos de erosión, se convierte en una necesidad apremiante la información referente a cobertura y uso de suelo, al respecto han sido consultadas diferentes fuentes en las cuales se destacan la CAR cuya información se encuentra en escala 1:25.000, y hace referencia a todo el plan de manejo de los cerros orientales, y el Ministerio del Medio Ambiente cuya información está a escala 1:10.000, del estudio que realizó el IGAC como soporte para la reglamentación de los cerros orientales. En cuanto a la información urbana se tienen como fuentes la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB), y Planeación Distrital.

A continuación se hace un breve resumen de los aspectos más relevantes, con relación al objeto del proyecto, identificados en cada uno de los estudios consultados.

2.2.1 Diseños definitivos detallados, para la construcción de las obras de adecuación, control de crecientes y descontaminación a través de interceptores, colectores, para todas las quebradas de la parte suroriental de Santafé de Bogotá D.C., incluidas en las localidades de Santa Fé, San Cristóbal, Rafael Uribe Uribe y Usme.

Autor: GOMEZ CAJIADO & ASOCIADOS

Año: 1999

El estudio se plantea como objetivo general la conservación de las quebradas de la forma más natural posible a través del saneamiento por medio del uso de colectores e interceptores para aguas negras, la simulación hidráulica para periodos de retorno de 10, 25 y 100 años, y la determinación de la ronda hidráulica Pr=100 años. Adicionalmente se plantea la determinación de las zonas de manejo ambiental, minimizar el impacto social por reasentamientos, el análisis de riesgo geotécnico aledaño a las quebradas y la estabilización de zonas inestables. Finalmente se propone generar el plan de manejo ambiental.

Como criterios para la definición de la zona de protección se tomó que la delimitación de la ronda hidráulica en la zona urbana sea aquella dada por el nivel para un periodo de retorno de 100 años, para la zona suburbana el de periodo de retorno 100 años y 6 metros más, mientras que para zonas geotécnicamente inestables es de 15 metros más allá de donde se logra estabilizar.

Con relación a la zona del presente estudio se analizó la Quebrada La Pichosa, definiéndola como una quebrada perenne, que atraviesa los barrios Aguas Claras, San Jerónimo del Yuste, San Cristóbal Alto y sigue por tubería Ø 2.10m hasta entregar al barrio Montecarlo.

En lo que respecta a redes y sus características se tiene que para aguas negras se realizaron los diseños para el barrio Aguas Claras (5219, 5218 E.A.A.B.), este barrio no cuenta con alcantarillado pluvial. En la parte media no se presentan aportes por ser predios privados. Para la zona baja (Cll. 17 Este Río San Cristóbal), existe alcantarillado combinado. A la quebrada llegan 33 descargas de aguas negras.

En cuanto a basuras, existe un servicio de recolección programado, sin embargo se deposita gran cantidad de desechos a la quebrada, especialmente en las zonas más deprimidas.

La estabilidad del cauce se ve comprometida en varios puntos, entre los que se destacan los siguientes:

Barrio Aguas claras (inestabilidad cll16 sur y deslizamiento trv17).

Barrio Montecarlo, movimientos activos.

Barrio San Cristóbal Alto, fallas en pavimento, ruptura tubería Ø 6", colector roto (Cll.13 sur).

Para la parte de cobertura, se presentan bosques o cordones protectores de eucalipto (eucaliptos populus), para el primer kilómetro desde la torre de alta tensión. En el sector urbano entre las calles 10 sur y 13 sur.

Para los diseños se adoptaron los siguientes parámetros: Área de drenaje 143 Ha, coeficiente de escorrentía rural 0.4, coeficiente de escorrentía urbano 0.45, para la intensidad se utilizó ecuación del programa de información y análisis de tormentas implementado por la empresa.

Desde el punto de vista geotécnico se estudió la estabilización del deslizamiento sobre la margen derecha de la quebrada San Cristóbal, K1+200 a K1+215, parte baja, diseño de gaviones para zonas de erosión retrogresiva del cauce y análisis de estabilidad de excavación para box culvert y caída en concreto. Para esta zona se identificó que el perfil del suelo presenta rellenos de arcillas limosas, limos arcillosos y limos orgánicos de humedad alta, plasticidad alta y consistencia blanda a media. Intercalaciones de estratos de limos arcillosos, arcillas limosas grises de plasticidad media a alta y consistencia blanda a firme y arenas arcillosas carmelitas grises.

Con relación a los estudios hidráulicos, estos se hicieron con el fin de determinar el perfil de flujo gradualmente variado, obteniendo lámina de agua, velocidad y demás características, para periodos de diseño de 10, 25 y 100 años.

Se elaboraron diseños para estabilización del cauce a caudal máximo. Se corrió el programa (HEC –RAS) de nuevo y se halló la lámina de agua para 100 años, con la que se determinó la ronda hidráulica y luego la zona de protección ambiental. Se localizaron los interceptores de aguas negras, en vía pública vecina a la zona de protección.

Para el análisis de la quebrada, el cauce se sectorizó en dos: El primero en el barrio Aguas Claras (estudio 4367; K0+0.00 y K1 +0.00) como zona sub urbana y el segundo de K1 al río San Cristóbal en zona urbana. La simulación muestra que para un periodo de 100 años se presenta desbordamiento en tres puntos en el primer sector. Por su parte el cauce es capaz de transitar los flujos de un periodo de 25 años. Para el sector 2 no se presentan problemas.

Como conclusión, se tiene que hay 121 predios afectados de los cuales 59 presentan riesgo geotécnico, 55 ocupan zona de ronda y zona de protección y 7 se afectan por obra. Se diseñaron y recomendaron obras de control de aguas negras, obras de control de erosión del cauce y obras de estabilización. Finalmente se presenta el plan de manejo ambiental para el desarrollo de obras.

2.2.2 Uso actual de las tierras de la reserva forestal del bosque oriental de Bogotá

Autor: MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE-IGAC

Año: 2004

Este trabajo fue realizado como soporte para la reglamentación del manejo de los cerros orientales, y se desarrolló en el año 2004 por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para el Ministerio del Medio Ambiente.

Cobertura del Suelo

Para este trabajo se realizó la recopilación de documentos existentes relacionados con el tema, posteriormente se realizó un trabajo de fotointerpretación para definir las coberturas, principalmente de bosques, pastos, cultivos, zonas urbanas y demás zonas susceptibles a ser cartografiadas en escala 1:10.000, acto seguido se escogieron unas zonas piloto para detallar su análisis y el posterior reconocimiento del terreno.

Como resultado de este trabajo se presenta el mapa de coberturas escala 1:10.000 y un documento con el tipo fisonómico, tipo florístico dominante y el estado de intervención, como se muestra en la Tabla 2-2.

TIPO FISONÓMICO	TIPO FLORÍSTICO DOMINANTE	ESTADO DE INTERVENCIÓN	SIMBOLO
VEGETACIÓN ARBÓREA	Bosque denso con especies nativas, heterogéneo. Predominan especies de encenillo, tuno, gaque, rodamonte. Especialmente en páramo y subpáramo.	Sin intervención o muy escasa intervención	Be
	Bosque denso con especies de tuno: Miconia, rodamonte, encenillo y gaque. Se localiza especialmente en la zona de subpáramo.	Sin intervención o muy escasa intervención	Be1
	Bosque poco denso heterogéneo, con especies nativas como: canelo de páramo, tagua, cucharo, encenillo. Especialmente en áreas de subpáramo.	Escasa intervención	Be2
	Bosque ralo heterogéneo, con especies nativas, localizado especialmente en áreas de páramo.	Alta intervención	Be3

TIPO FISONÓMICO	TIPO FLORÍSTICO DOMINANTE	ESTADO DE INTERVENCIÓN	SIMBOLO
	Bosque plantado de eucalipto. Localizado especialmente en subpáramo y zonas de bosque andino.	Moderada intervención	Pfe
	Bosque plantado de pino espátula o barbudo. Localizado en subpáramo y algunos sectores de páramo.	Escasa intervención	Ppp
	Bosque plantado de ciprés. Especialmente ubicado en subpáramo	Escasa intervención	Pci
	Asociación de especies arbóreas nativas y exóticas como: aliso, higuera, siete cueros, pino, eucalipto, acacia japonesa, acacia y acacia negra.	Alta intervención	Aca
VEGETACIÓN ARBUSTIVA	Asociación de especies nativas arbustivas como agraz, tuno, chite, chusque. Vegetación localizada en áreas de páramo y subpáramo.	Poca intervención	Ra
	Asociación de especies nativas arbustivas. Composición florística similar a la anterior pero con menor densidad. Localizada especialmente en áreas de subpáramo.	Moderada intervención	Ra1
	Asociación de especies arbustivas como chite, amargoso, retamo espinoso, chisque, en áreas de subpáramo principalmente.	Moderada a alta intervención	Ma
	Vegetación dominante de chusque. Localizada especialmente en áreas de subpáramo principalmente.	Moderada intervención	Chu
VEGETACIÓN HERBÁCEA	Pastos naturales con predominancia de carretón blanco, falsa poa, kikuyo, pasto de olor. En páramo y subpáramo.	Moderada a alta intervención	Pn
	Pastos mejorados en áreas pequeñas, localizados en subpáramo especialmente.	Alta intervención	Pm
	Pastos enmalezados, con gramíneas y herbáceas en mal estado. Presencia de ciertas arbustivas aisladas. En subpáramo especial.	Moderada intervención	Pe
	Vegetación herbácea natural con especies de: paja de ratón, frailejón, chite.	Escasa a moderado	Pa

TIPO FISONÓMICO	TIPO FLORÍSTICO DOMINANTE	ESTADO DE INTERVENCIÓN	SIMBOLO
	Cultivo especialmente de papa, arveja, haba, maíz. Áreas de subpáramo especialmente	Muy intervenido	Cu
OTRAS COBERTURAS	Áreas desnudas y afloramientos rocosos.		Ar
	Construcciones urbanas		Cr
	Construcciones rurales		Cur

Tabla 2-2. Leyenda de cobertura de la reserva forestal Bosque oriental de Bogotá.

El inconveniente que se presentó con esta información es que no se encontró el plano de coberturas al cual se hace referencia en el informe escrito, encontrándose para la zona de estudio una información de coberturas básica en la que solamente se presentan bosques y matorrales, como se observa en la Figura 2-2.

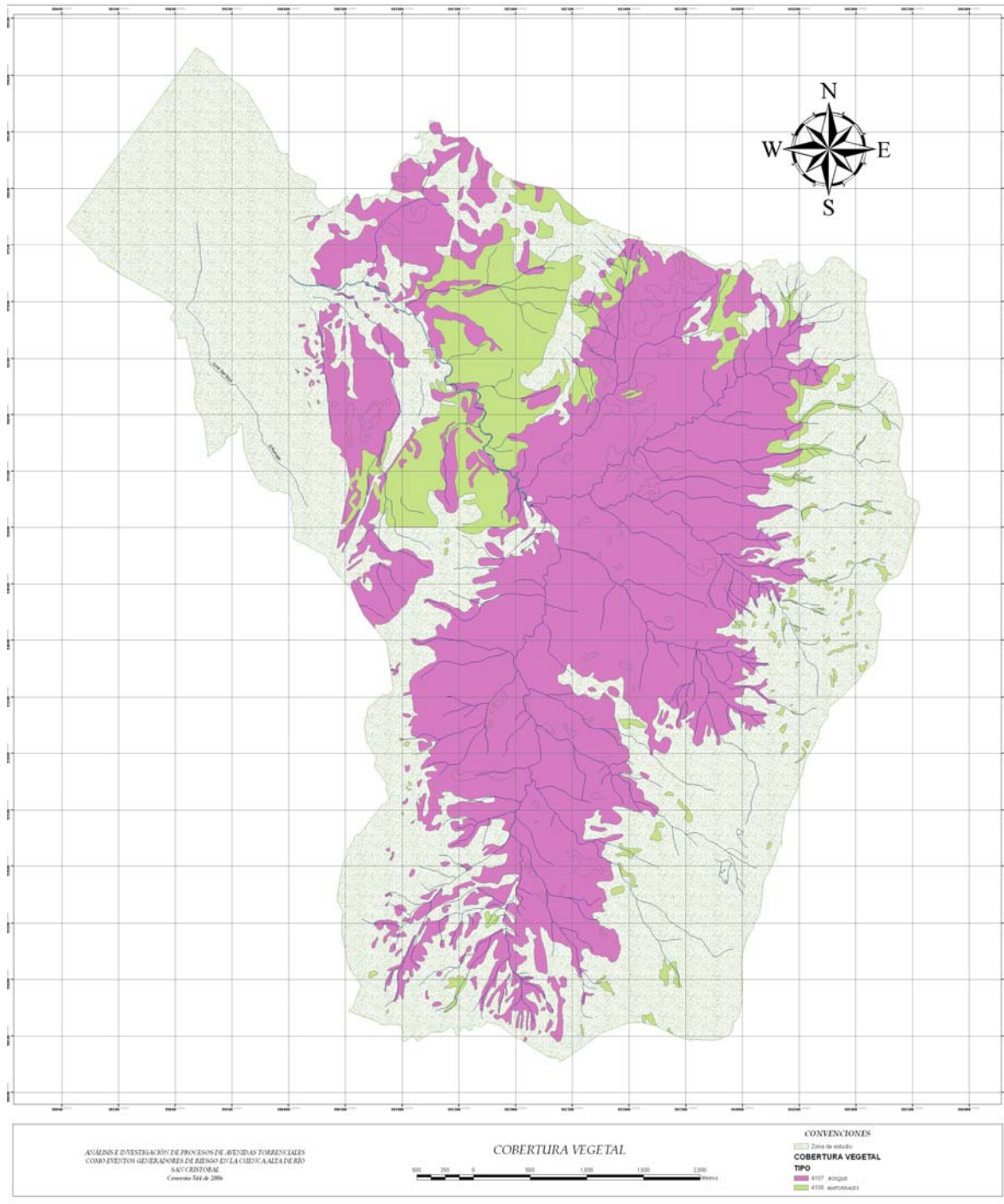


Figura 2-2. Unidades de suelo. Fuente: CAR (2004).

Usos del suelo

Se definen como el “conjunto de actividades provenientes de la intervención humana, directa o indirectamente sobre los recursos que hacen parte de ella, mediante los impactos generados por actividades socio-económicas, en forma cíclica o permanente con el fin de satisfacer sus necesidades”.

El IGAC utilizó para este trabajo la “Clasificación de uso de tierras” de la subdirección de agrología del instituto. (IGAC, 1998), presentando las unidades cartográficas de uso de tierras, que se presentan en la Tabla 2-3.

UNIDADES CARTOGRÁFICAS DE USO DE TIERRAS (UCUT)	DESCRIPCIÓN
PRESERVACIÓN	Son aquellas que se encuentran en programas estatales o particulares, contra su destrucción irreversible, mediante un conjunto de actividades dirigidas a proteger y a mantener especialmente
PROTECCIÓN	Son zonas en las cuales se busca proteger y mantener la funcionalidad de los ecosistemas alrededor de servicios básicos, como la protección de suelos frente a procesos erosivos, regulación hídrica y paisaje.
AGRICULTURA	Zonas de cultivos, producción de tierras.
GANADERÍA	Explotación de especies animales.
MINERÍA	Zonas relacionadas con la extracción de minerales y materiales de construcción.
OBRAS CIVILES	Se define como todo el tipo de construcciones que el hombre ha levantado para un fin determinado, bien sea como obra aislada o como un conjunto de las mismas.
OTROS USOS	Botaderos de basura, zonas de reciclaje
ASOCIACIÓN DE AGRICULTURA Y GANADERÍA	Zonas en las que se combinan estos dos usos de tierra

Tabla 2-3. Descripción de las unidades cartográficas de uso de tierras de la reserva forestal Bosque oriental de Bogotá.

2.2.3 Plan de manejo reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá

Autor: CAR

Año: 2006

Este trabajo cubrió los cerros orientales y de él se extrajo la información referente a suelos, usos de suelo y coberturas de la zona de estudio “Cuenca alta del río San Cristóbal”.

Fisiografía

El análisis fisiográfico, se realizó mediante la interpretación de imágenes de la superficie terrestre que se basa en la relación paisaje-suelo. Se asume aquí, tal como lo hace el manual de levantamientos de suelos USDA (1951), que los suelos son perfiles y a la vez paisajes. De una parte, el suelo es un componente del paisaje fisiográfico pero, sus características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas resultan de la interacción de los restantes componentes del paisaje, como son: su relieve, su material o materiales litológicos y su cobertura vegetal, todos actuando bajo un mismo clima, en un lapso de tiempo determinado (Villota, 1992).

Para este estudio fue utilizada la metodología propuesta por Villota, en el año 1990.

Suelos

Se describen utilizando el sistema taxonómico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Taxonomy), el cual se ha aplicado en toda Latinoamérica y que definen las unidades taxonómicas de suelos.

Por otro lado, la ocurrencia de los cuerpos de suelos en el paisaje se especializan, a través de las unidades cartográficas como: Consociación, cuando uno de los suelos ocupa el 50% o más del área; asociación, cuando existen dos o más suelos dominantes y que ocupan menos del 50% del área y por último el complejo de suelos que ocurre al igual que la asociación, pero que se distribuyen en forma caótica en el paisaje (Van WanBeke, 1985).

Manejo y Uso de Suelos

Este análisis fue realizado según el contenido pedológico de las diferentes unidades fisiográficas, con el fin de dar criterios de orientación de uso y manejo de los mismos, en él se arrojaron áreas de suelos con características particulares que

puedan servir para los planes de manejo futuros. La distribución espacial de estas unidades en el área de estudio se presenta en la Figura 2-3.

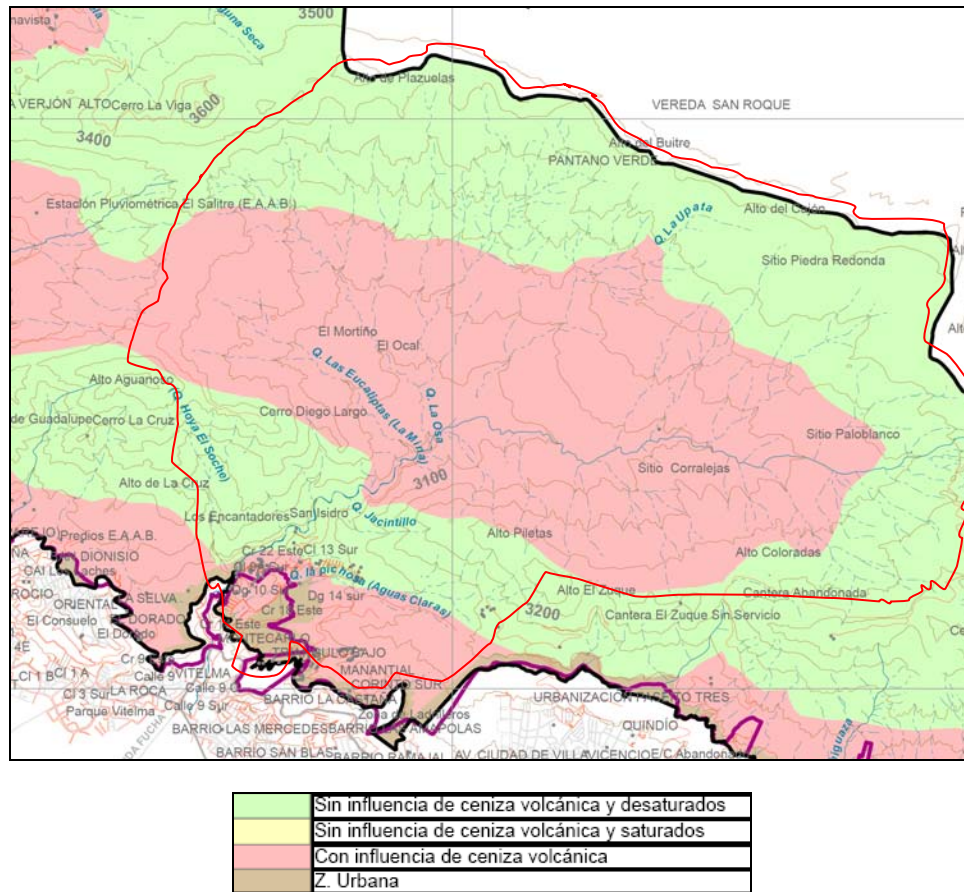


Figura 2-3. Unidades de suelo. Fuente: CAR (2006).

- Unidades cartográficas donde dominan los suelos derivados o con influencia de cenizas volcánicas:**

Son suelos profundos a moderadamente profundos, bien drenados, con media a alta retención de humedad; las texturas pueden variar entre finas hasta gruesas. Los contenidos de materia orgánica son medios a altos, la mayoría ácidos; físicamente ofrecen un buen soporte para el anclaje y toma de nutrientes por parte de las plantas, ya que la ceniza mejora la estructura del suelo y genera mejores relaciones. Agua, aire, químicamente, tienen el problema que algunas veces

poseen bajos contenidos de calcio, magnesio y potasio; además la gran mayoría de estos suelos son fijadores de fósforo.

Físicamente, son suelos muy susceptibles a procesos de remoción en masa, ya que actúan como una esponja que cuando está saturada, sin cobertura vegetal y en fuentes pendientes, puede fluir cuesta abajo.

- ***Unidades cartográficas donde dominan los suelos sin influencia de ceniza volcánica y desaturados:***

Los suelos se han desarrollado a partir de las rocas de dichas áreas, siendo diferentes las características a los suelos desarrollados sobre mantos de cenizas volcánicas; en general, la cantidad de nutrientes como calcio, magnesio, potasio y fósforo es mediana a baja, la saturación y contenido de aluminio, generalmente, es alta y puede llegar a ser tóxica para algunas especies vegetales; los porcentajes de materia orgánica son altos en superficie y bajos en profundidad. En estas unidades cartográficas se hacen más frecuentes los suelos limitados en su profundidad efectiva, por roca que puede encontrarse a 30 o 50 cm de profundidad.

- ***Zona Urbana.***

Cobertura del Suelo

La información de cobertura actual se basa en el mapa generado con foto identificación y fotointerpretación de aerofotografías del vuelo IGAC 2673, las cuales fueron tomadas en marzo de 2002, a escala promedio 1:27.000. El mapa resultante se presenta aquí como la Figura 2-4.

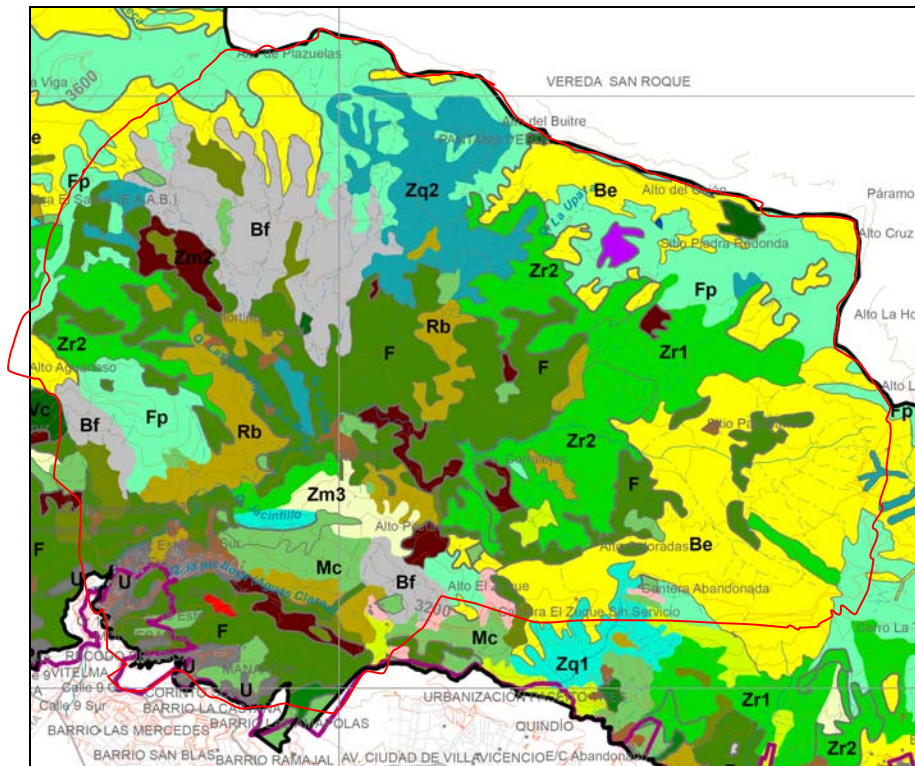


Figura 2-4. Cobertura del suelo. Fuente: CAR (2004).

SIMB	LEYENDA	DIAGNOSIS
Be	Bosque de Subpáramo	Agregados leñosos por encima de los 3200 m.s.n.m.
Bf	Bosque fragmentado	Dosel arbóreo con discontinuidades; cobertura leñosa con estratificación diferenciada.
Rb	Rastrojo Bajo	Dosel arbustivo continuo; Arbolitos emergentes dispersos
Mc	Matorral Cerrado	Dosel arbustivo continuo
E	Erial	Vegetación y parte superficial del suelo removida mecánicamente
F	Plantación Forestal	Patrón Forestal regular de especies introducidas
F/St	Plantación forestal con sotobosque	Plantaciones de especies introducidas con sotobosque de especies nativas.
Zr2	Misceláneo de Parches de Rastrojo	Pequeños parches de rastrojo con matriz de pastizal (entre

SIMB	LEYENDA	DIAGNOSIS
	Medianamente Fragmentado	30 a 50 % del área total)
Zq1	Misceláneo de Cordones Riparios ligeramente Fragmentado	Estrechos Cordones de Bosque o Rastrojo sobre la red de drenajes (menos del 30% del área total)
Zq2	Misceláneo de Cordones riparios Medianamente Fragmentado	Estrechos Cordones de Bosque o Rastrojo sobre la red de drenajes (entre 30 a 50 % del área total)
Zq3	Misceláneo de Cordones riparios Intensamente Fragmentado	Estrechos Cordones de Bosque o Rastrojo sobre la red de drenajes (mayor del 50 % del área total)
U	Asentamientos Urbanos	Concentración de viviendas (Borde Occidental de la Reserva)
X	Explotaciones Mineras	Excavaciones, terraceos, canteras

Tabla 2-4. Leyenda de Cobertura del suelo (CAR - 2006).

2.2.4 Estudio de abastecimiento de agua para la ciudad de Bogotá y áreas circundantes basado en el manejo integrado de recursos hídricos en la República de Colombia- Informe de Resultados.

Autor: AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN - JICA

Año: 2007

El objetivo general del estudio es el de formular el Plan Maestro de Suministro de Agua Potable para el Área Metropolitana de Bogotá usando aguas subterráneas, buscando primordialmente resolver los dos problemas planteados anteriormente.

El área de Estudio está localizada dentro de la Cuenca del Río Bogotá, la cual la conforman el Río Bogotá y sus afluentes entre ellos el Río Fucha que nace en la Quebrada San Cristóbal. Se han construido once (11) embalses, dentro de la cuenca, para el desarrollo de los recursos de agua superficiales. El consumo actual de agua, en la Cuenca de Bogotá, asciende a 27,22 m³/s, comparado con el total de los recursos hídricos superficiales de 31 m³/s. Obviamente, el consumo de agua es mayor a los recursos superficiales dado que se debe considerar el flujo de descarga permanente.

El censo poblacional del año 2005, contabilizó 7,6 millones de personas con un incremento de 2,2 millones de personas con relación al censo de 1993. La tasa de crecimiento anual durante los dos censos fue de 2,9%, un poco menor a la tasa del 3% presentada durante el período de 1985 y 1993. La población de Bogotá D.C. para el censo del año 2005 se incrementó en 1,9 millones de personas con una tasa anual de 2,7% desde 1993.

En un futuro cercano, la capacidad actual de suministro de agua para uso doméstico puede ser menor que la demanda, por lo que el Plan Maestro ha formulado la Expansión del Sistemas Chingaza y La Regadera y la construcción del Sistema de Conducción de Agua del Sumapaz. De acuerdo con el Plan Maestro, estos tres proyectos darán aproximadamente 17,8 m³/s de agua para la Sabana Bogotá.

La evaluación de la recarga de agua subterránea indica que esta puede ser de 36 mm/año según estudios de INGEOMINAS, 23 mm/año según los estudios de la C.A.R. y de 145 mm/año según los estudios del Equipo de Trabajo JICA.

Los métodos de análisis empleados por INGEOMINAS y la C.A.R. se basan en balances de agua los cuales toman en cuenta la precipitación, la descarga de los ríos, la evapotranspiración y la recarga de agua subterránea. La gran diferencia entre los estudios es la forma como se estima la evapotranspiración lo cual hace que existan diferencias sustanciales en el cálculo de recarga para de agua subterránea.

Los Cerros Orientales y los Cerros del Sur tienen las tasas de precipitación más altas de la Sabana de Bogotá, por lo que la recarga de agua subterránea, también es alta. En la zona aflora la arenisca de la Formación Guadalupe, del Cretácico, la cual tiene alta permeabilidad, condición que hasta el momento no ha sido aprovechada.

Bogotá, tiene tres sistemas principales para el suministro de agua: el Sistema de Chingaza, el Sistema Tibitóc y el Sistema Sur, cada sistema tiene fuentes de agua y plantas de tratamiento. Chingaza suministra un caudal de agua de 10,0 m³/s, el Sistema Tibitóc 4,0m³/s y el Sistema Sur 0,5 m³/s para un total de suministro de agua para el Área Metropolitana de Bogotá de 14,5 m³/s en el año 2006. La capacidad total de las instalaciones es de 25 m³/s. Por otro lado, la cantidad de agua en concesión es de 17,84 m³/s y la cantidad de agua con desarrollo potencial es de 21,04 m³/s. La capacidad total de las instalaciones excede el volumen de concesión y el desarrollo potencial.

El Estudio Piloto para la recarga artificial fue ejecutado en el estudio anterior realizado por JICA. En ese caso se analizó el lote de sedimentación de Vitelma

del Acueducto. Como resultado del Estudio Piloto se concluyó que 2.000 m³/día de agua puede ser inyectada dentro del acuífero a través del pozo de descarga. A partir de los resultados se aclaró que acuífero Cretáceo de los Cerros Orientales tiene una alta capacidad de recarga artificial. El agua para esta recarga artificial puede ser tomada del río San Cristóbal.

Con base en nueva información sobre agua subterránea y las actuales mediciones de 20 pozos en la ciudad de Bogotá, se puede concluir que la calidad del agua subterránea analizada es normal, exceptuando las muestras provenientes de algunos pozos cuyas aguas son muy turbias.

El equipo de trabajo JICA recolectó los datos geológicos y topográficos del área de estudio. Así mismo llevó a cabo la investigación de las características geológicas de Cerros Orientales y Cerros del Sur, revisó el mapa geológico existente para la interpretación de las fotografías aéreas y los resultados de otras investigaciones. El equipo de trabajo JICA diferenció el área de las formaciones cretácicas, las áreas de formación terciaria y cuaternaria, su estructura geológica e identificó el horizonte en el cual se espera hallar acuíferos, recomendando la posible situación para la explotación de pozos desde el punto de vista geotécnico.

La investigación geofísica empleando el método TEM (Time Domain Electromagnetic Method) se realizó en la Sabana de Bogotá en 64 puntos. El objetivo principal de la investigación TEM es conocer la distribución vertical y horizontal del principal acuífero de la Formación Guadalupe en los Cerros Orientales y en los Cerros del Sur.

Los datos del TEM fueron analizados como modelos de resistividad de instaladores eléctricos en cada punto y compilados para construir la estructura de resistividad en tres áreas. Se encontró una alta resistividad de más de 1.000 ohm-m en la capa de areniscas de la Formación Guadalupe en los Cerros Orientales y en los Cerros del Sur. La capa de alta resistividad aumenta su espesor en la parte central de los Cerros del Sur y es constante en área de gran altitud en los Cerros Orientales.

En un estudio anterior, la E.A.A.B. perforó pozos exploratorios del centro en la parte nororiental de los Cerros Orientales: Vitelma, La Saja y Suba. Los resultados de las perforaciones muestran un alto volumen de acuíferos cretácicos de los Cerros Orientales.

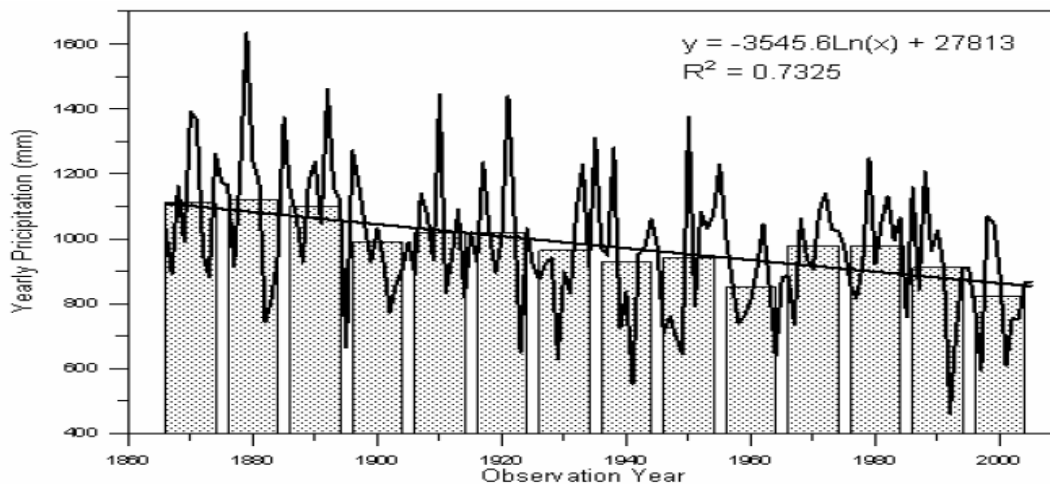
La recarga de agua subterránea fue analizada en el área de estudio utilizando la fórmula de balance hídrico y el método de la FAO. En la aplicación del método de la FAO, la teoría y supuestos del método, deben ser cuidadosamente

examinadas antes de su aplicación, de otra forma los resultados no son correctos.

La Formación Guadalupe del Cretácico tiene un alto potencial de aprovechamiento de agua subterránea en los Cerros Orientales y los Cerros del Sur. El potencial de aprovechamiento de agua subterránea depende de la distribución de las Formaciones Tiraba y Labor.

El promedio anual de precipitación en el área de estudio cambia de 600 mm en áreas planas a 1.300 mm en áreas montañosas. Las pequeñas fluctuaciones en la precipitación mensual fueron mostradas mediante un relativamente pequeño (*sic*) coeficiente de variación CV de 0,41. La fluctuación de la precipitación mensual se caracteriza por un patrón de dos picos en abril y en noviembre, respectivamente. El intervalo de recurrencia entre los cambios de sequía y lluvia cambia de 11 a 33 años, como se puede inferir de la Figura 2-5.

Los rangos de fluctuación en el promedio anual de otros factores meteorológicos principales son los siguientes: i) 10 a 14°C para temperatura; ii) 70% a 80% para humedad; iii) 800 a 1.200 para pan-evaporación. iv) 115 a 140 cal/cm²/día para radiación solar; v) 3.5 a 5 horas/día para hora de sol; y vi) 1.8 a 4.2 m/s para velocidad del viento.



Fuente: Equipo de Trabajo JICA

Figura 2-5. Precipitación anual durante los últimos 140 años.

El potencial de aprovechamiento de agua subterránea fue estimado a partir de la recarga, la cual fue analizada mediante el equilibrio del agua como se muestra a continuación:

$$\text{Recarga anual de agua subterránea (mm/año)} = P - \text{ETR} - D$$

donde,

P: Precipitación anual (mm/año)

ETR: Evapotranspiración real anual (mm/año)

D: Descarga de Ríos anual (mm/año)

El resultado de los estudios existentes de recarga de agua subterránea en la Sabana de Bogotá se muestra en la Tabla 2-5.

Los tres análisis emplearon la misma fórmula de balance de agua. Hay una diferencia mínima entre la precipitación y la descarga de los ríos entre estos estudios. Consecuentemente, la diferencia en la recarga de agua subterránea entre ellos es causada por una diferencia en la evaluación de la Evapotranspiración real (ETR). Esta diferencia depende de si la ETR se calcula a partir una base diaria o una base mensual. El estudio realizado por JICA calculó la ETR a partir una base diaria.

		JICA (2003)	CAR (2005)	INGEOMINAS (1995)
Recarga de Agua Subterránea (Promedio en la Sabana de Bogotá)		145mm/año	23mm/año	36mm/año
Método para el análisis		Análisis de balance de agua		
Elementos de balance del agua	Precipitación (P)	La precipitación fue analizada a partir de datos de observación a largo plazo		
	Descarga de Ríos(D)	La precipitación fue analizada a partir de datos de observación a largo plazo		
	Evapo-Transpiración real (ETR)	ETR fue calculado a partir del balance de agua en el suelo		
		ETR fue calculada a partir de bases diarias	ETR fue calculada a partir de bases mensuales	
Fuente: Equipo de Trabajo JICA 2003				

Tabla 2-5. Resultado del análisis de la recarga de agua subterránea en Bogotá.

El método de cálculo explicado arriba fue desarrollado por la FAO y decide el intervalo de día de irrigación. Por lo tanto, éste cálculo debe ser hecho en principio a partir de una base diaria. Sin el cálculo de base diaria lo asumido por

este método no será satisfecho, y se causarán considerables errores en el resultado.

La cantidad de recarga de agua subterránea en las cuencas de los ríos anteriormente mencionados, fue estimada en $337,6 \times 10^6$ m³/año, esto es 10m³/s. La precipitación de los Cerros Orientales y del Sur es alta, lo cual causará una alta recarga de agua subterránea. Esta condición natural le dará un alto nivel de ventaja al desarrollo del proyecto de aprovechamiento de agua subterránea en los Cerros Orientales y del Sur. El aprovechamiento de agua subterránea de 2m³/s en tiempos normales y de 4m³/s en emergencia parece posible en esta área, como se concluye en el estudio previo de JICA.

El Estudio Piloto para la recarga artificial se llevó a cabo en el lote de sedimentación de la E.A.A.B. en Vitelma.

Estructura del Pozo	Acuífero	Promedio de Flujo Inyectado	Capacidad de Agua Inyectada	Inyección Específica (=Flujo Inyectado/Capacidad de agua)	Capacidad específica de la Prueba de Bombeo
Profundidad del Pozo: 300m	Labor-Tierna	864m ³ /día	8.41m	103m ² /día	69 m ² /día (Rendimiento 1,296 m ³ /día)
Diámetro del Pozo: 8pulgadas	Nivel Estático de agua -6.63m				
Fuente: Estudio sobre la Sostenibilidad del Aprovechamiento de Aguas Subterránea para la Sabana de Bogotá, en la República de Colombia.					

Tabla 2-6. Resultados del Estudio Piloto.

Los ríos disponibles para la recarga artificial son el río San Cristóbal y el río San Francisco que tienen un caudal permanente durante todo el año. Los pozos para la recarga artificial pueden ser perforados a lo largo de estos ríos. La recarga artificial puede conservar el agua subterránea por inyección de agua de río en los acuíferos. Antiguamente la E.A.A.B. utilizó el río San Cristóbal y el río San Francisco para el suministro de agua, pero en la actualidad no se emplean.

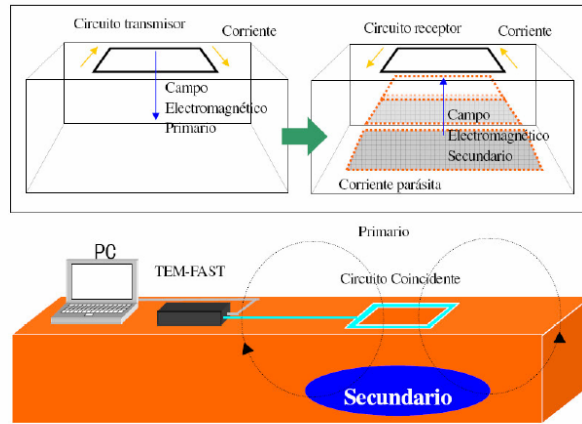
Dentro del análisis se hizo un estudio socio-económico el cual estaba compuesto por entrevistas con los líderes de las comunidades y con la comunidad misma, y por medio de encuestas en las los hogares de estas comunidades. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2-7.

Localidad	Nombre del área seleccionada	No. de cuestionarios	Problemas identificados
1. Usaquéen	1. Altos de Serrezuela	12	Los carros tanque no prestan servicio de manera constante.
	2. Lomitas	9	No existen fuentes de agua.
	3. Villas de la Capilla	13	No existen vías pavimentadas.
	Subtotal	34	
2. Chapinero	Vereda Monserrate	17	Problemas de seguridad. No existen fuentes de agua.
3. Usme	1. Alaska	7	Problemas de seguridad. Las aguas para consumo humano provenientes de cursos de agua están contaminadas.
	2. San Pedro	19	Las aguas para consumo humano provenientes de cursos de agua están contaminadas.
	3. Las Violetas	10	Los carros tanque no prestan servicio de manera constante.
	4. Villa Rosita	20	Proliferación de conexiones ilegales a tanques.
	5. Tihuaque	10	Problemas de seguridad. No existen vías pavimentadas.
	Subtotal	66	
4. San Cristóbal	1. Aguas Claras	16	Baja calidad de aguas para consumo humano provenientes de cursos de agua.
	2. San Manuel	10	Baja calidad de aguas para consumo humano provenientes de cursos de agua.
	3. Corinto	10	Problemas de seguridad. Los carros tanque no prestan servicio de manera constante.
	4. Villa Aurora	11	Falta de agua superficial
	5. Ciudad Londres	16	Las aguas para consumo humano provenientes de cursos de agua están contaminadas.
	Subtotal	63	
5. Ciudad Bolívar	Quiba – Verbenal Sur	20	No existen fuentes de agua
Total	15 áreas	200	

Fuente: Consultoría para las actividades de diseño de un programa que permita entregar agua potable a los sectores de la población no cubiertos por el Servicio. ACUEDUCTO de Bogotá Enero de 2005 por Ignacio Castro.

Tabla 2-7. Conclusiones del estudio socio-económico a través de entrevistas sobre la calidad del agua..

El método TEM se empleó para el muestreo geofísico en el área de estudio. Esta es una de las técnicas geofísicas electromagnéticas (EM) que inducen corrientes eléctricas en la tierra empleando la inducción electromagnética, la Figura 2-6. muestra esquemáticamente el principio básico del ensayo. A este método usualmente se le denomina como Exploración Electromagnética Transitoria (TEM) o exploración de Dominio de Tiempo Electromagnético (TDEM).



Fuente: Rowland B. French, Ph.D. *R.G.:Time-Domain Electromagnetic Exploration*

Figura 2-6. Exploración de Dominio de Tiempo Electromagnético.

El muestreo TEM se realizó en 13 puntos al sur de los Cerros Orientales, en áreas de matorrales ubicadas al sur de los Cerros Orientales. Como se observa en la Figura 2.7, uno de esos puntos cae dentro del área de estudio del presente proyecto. La mayoría de los puntos de muestreo en el sur de los Cerros Orientales muestran un modelo de dos capas que consiste de una primera capa de alta resistividad y una segunda de baja resistividad. La primera capa en los puntos de muestreo situados a mayores altitudes exhibe resistividades más altas y mayor espesor. Por otro lado, la primera capa de los puntos de muestreo ubicados a baja altitud no presenta altas resistividades, cosa que contrasta con lo encontrado en lugares ubicados a alta altitud.

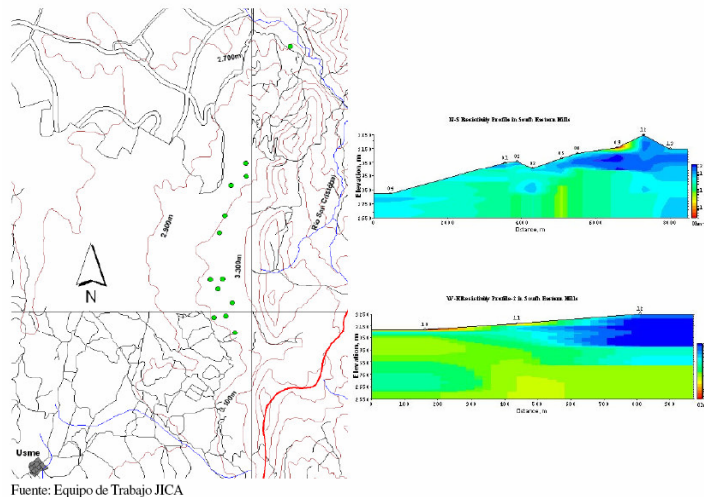
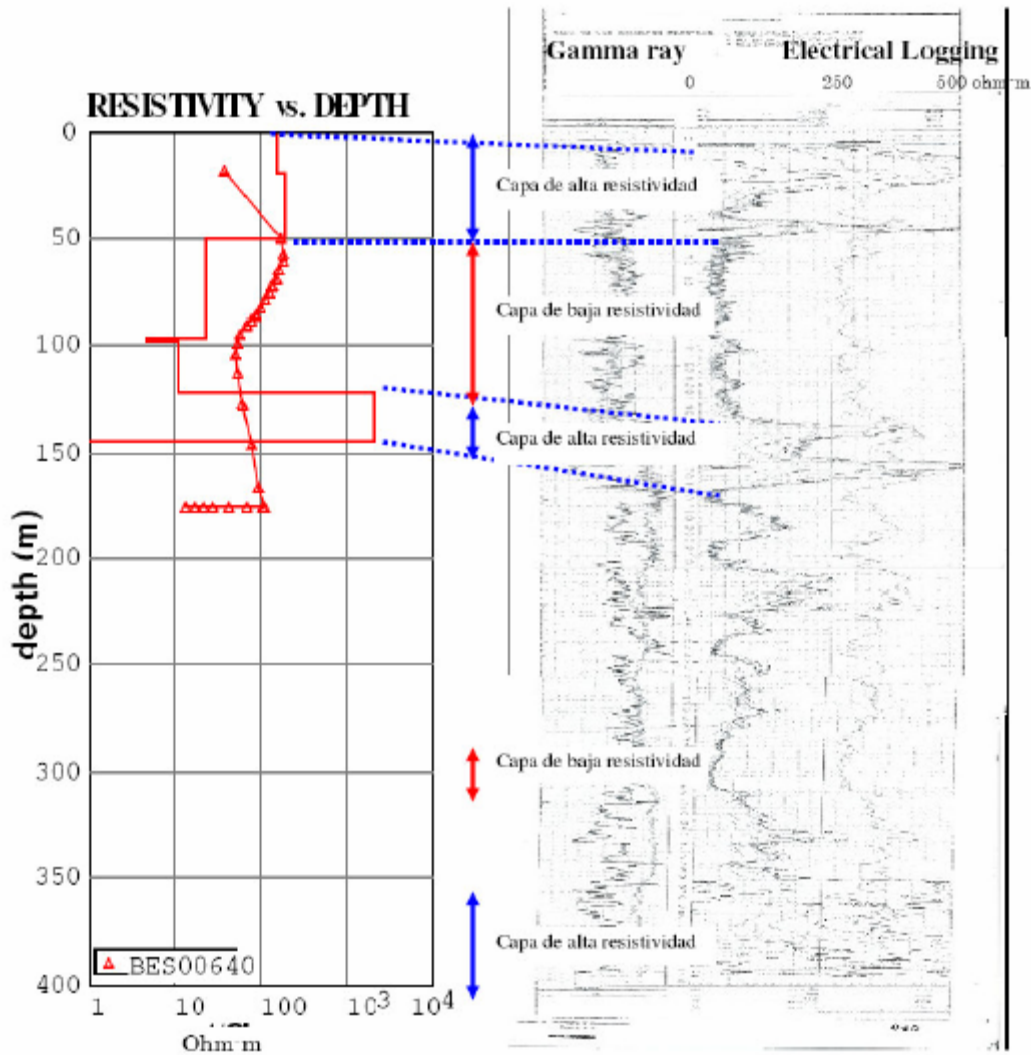


Figura 2-7. Puntos de muestreo TEM y análisis de resultados en el sur de los Cerros Orientales (Cerca de Usme)



Fuente: Equipo de Trabajo JICA

Figura 2-8. Resultados TEM para el punto No. 6, ubicado en la cuenca del río San Cristóbal.

Las zonas de alta resistividad corresponden al acuífero principal donde dominan las capas de areniscas del Cretácico del Grupo Guadalupe, que aparece representado en la sección derecha de la Figura 2-8. Además, las zonas de

baja resistividad corresponden a las capas de confinamiento en donde dominan las capas arcillosas del Grupo del Cretácico la Formación de Guadalupe.

Las capas de arenisca del Cretácico del Grupo Guadalupe se identificaron como un acuífero de alta resistividad. Por otro lado, las capas arcillosas de este Grupo se identificaron como capas de confinamiento de baja resistividad.

2.2.5 Estudio de la ladera occidental del barrio Laureles, medidas correctivas y de mitigación para estabilizar la zona de estudio

Autor: FOPAE – CIVILES LTDA. - HIDROCONSULTA LTDA.

Año: 1998

La zona de estudio corresponde al barrio Laureles, entre la transversal 9 este y la carrera 21B este, entre el río San Cristóbal y la diagonal 10. A mediados del año 1991 comenzó la urbanización del sector, en predios de antiguos galpones, además una laguna alimentada por agua subsuperficial fue modificada para poder ser urbanizada. Este desarrollo constructivo generó en toda la margen izquierda del río, una serie de deslizamientos de carácter rotacional.

Para propósitos prácticos la zona de estudio se dividió en dos: la primera corresponde a un deslizamiento rotacional retrogresivo en la parte alta del barrio, entre la vía de acceso y el límite occidental del área. La otra zona, parte baja, es la comprendida entre el río San Cristóbal y la vía de acceso.

En general, la zona está conformada por un depósito fluvio-torrencial, con un espesor que varía de 10 metros en la parte alta, a 2 metros en la parte baja. Este depósito descansa sobre arcillolita de la Formación Guaduas. Se plantea que el problema es debido a la carencia de sistemas de acueducto y alcantarillado

Con el fin de estudiar la situación del área y recomendar medidas a seguir se ejecutaron las siguientes actividades:

Levantamiento topográfico 1:500

Geología: depósito reciente fluvio-torrencial (Qft), compuesto por fragmentos subangulares de arenisca cuarzosa, con tamaños tipo bloques a grava, con matriz areno limosa y cementante débil. Formación Guaduas (TKgu), al oriente del barrio Laureles, en donde se presenta arcillolita, con dos paquetes delgados de arenisca cuarzosa.

Geotecnia: (Qft), material permeable y erodable con los siguientes parámetros de resistencia:

MATERIAL	Cohesión (Kg/cm²)	φ° fricción	γt (Kg/cm³)	γd (Kg/cm³)
Arcillolita	0.8	36	2.12	1.87
M. relleno	0.05	21	2.04	1.62
fluviotorrencial	0.03	25	1.97	1.62

Tabla 2-8. Parámetros de resistencia.

Para el depósito fluviotorrencial se realizaron cortes directos sobre probetas elaboradas con el material fino, compactadas a una energía igual a la empleada en el ensayo Proctor Estándar. Aun cuando se tengan los parámetros de resistencia, se debe tener en cuenta que no se realizaron ensayos de corte para todas las muestras.

Geoeléctrica: Se llevaron a cabo 6 sondeos geoeléctricos, con rumbo aproximado del eje de N30°E. En general se tienen los siguientes espesores: (Qft), espesor de 2 metros (parte baja) a 18 metros (parte alta). (TKgu), 8 metros de espesor para arcillolita y 3 metros de espesor para arenisca.

Hidráulica: la presencia de aguas negras y empozamientos permanentes en la parte alta, favorecen la infiltración y lubricación del material que se encuentra en movimiento.

Zonificación: con base en los procesos morfodinámicos y la topografía se establecieron 4 zonas. Zona 1A, terrazas intermedia y alta, parte media y alta de ladera; Zona 1B, parte media de la ladera donde afloran arcillolitas; Zona 2A, rivera izquierda del río; Zona 2B, comprende los tramos de terrazas inestables.

Desde el punto de vista de amenaza, el área se dividió en 5 zonas, a las que se les asignó una probabilidad de falla, como se muestra en la Tabla 2-9.

ZONA	P.F.	AMENAZA
1	0.8213	Alta
2	0.4568	Media
3	0.9970	Alta
4	0.8213	Alta
5	0.1600	Baja

Tabla 2-9. Probabilidad de falla.

Estos valores se definieron a partir de análisis de estabilidad y evaluaciones probabilísticas, considerando condiciones de lluvia, sismo y un periodo de análisis de 20 años.

Mediante la metodología de Leone (1996), se calculó el índice de vulnerabilidad física, social, la vulnerabilidad general y se definió el nivel de vulnerabilidad.

En términos generales, el sector muestra un nivel de vulnerabilidad de alto a muy alto y de riesgo muy bajo. Por lo anterior las soluciones se orientarán hacia el control de aguas desde la parte alta a las zonas en o con posibilidad de movimiento, control de la socavación de la pata del talud por socavación del río y el manejo del agua para garantizar estabilidad de los taludes contra deslizamiento.

En la evaluación del riesgo, se buscó el asociado a pérdidas económicas y al número de personas afectadas, siendo estos índices el producto de la probabilidad de falla de la zona que amenaza la vivienda por el respectivo índice de pérdida. Para el nivel de riesgo se utiliza el índice de riesgo económico IRE, y número de personas afectadas, como el producto de las personas por vivienda por el índice de riesgo de personas IRP.

Se plantearon una serie de obras para el manejo de las aguas en la zona, como: cunetas, alcantarillado comunal, definición de ZMPA, muros de contención y diques.

2.2.6 Estudio geotécnico de valuación de las alternativas de mitigación y diseños de las obras recomendadas para estabilizar el barrio Ramajal ubicado en la localidad de San Cristóbal.

Autor: TEA Ltda.

Año: 1998.

La zona se encuentra enmarcada, entre la avenida circunvalar al oriente, las calles 30 A Sur y 30 Sur al occidente; y al norte y sur con la quebrada San Blas y la

transversal 12 Este. El desarrollo urbano sobre el barrio Ramajal y sus alrededores, surge a partir de la industria extractiva en los denominados chircales, que por el tipo de personal requerido, motivó el asentamiento de urbanizaciones ilegales, con deficientes sistemas constructivos.

Dentro del trabajo de campo, se realizó la evaluación e inventario, tanto de viviendas como de infraestructura de servicios. Se tuvo en cuenta el estado del proceso de reasentamiento de las familias a cargo de la UPES.

Geológicamente, la zona se encuentra sobre los estratos sedimentarios de la formación Bogotá, inclinados hacia el noreste formando una serie monoclinial del amplio sinclinal de Usme-Tunjuelito. El barrio se encuentra sobre areniscas y arcillolitas del conjunto inferior de la Formación Bogotá, con un espesor de unos 620 metros y un conjunto superior de arcillolitas grises de un espesor aproximado de 100 metros (canteras de ladrilleras).

Se presentan sobre la margen de la quebrada, conos de deyección, producto de los escombros de la explotación minera de la zona. Los suelos residuales de la zona presentan espesores de 50 a 80 cm, siguiendo la inclinación de la pendiente. En la zona se presentan procesos de remoción en masa moderados, reptaciones y agrietamientos abiertos

Para la caracterización de materiales, se ejecutaron 10 apiques y 3 trincheras, y en laboratorio se realizaron ensayos de clasificación y resistencia (corte directo). En general, los rellenos presentan espesores de 2.5 metros, de suelo arcilloso de baja plasticidad, con variaciones de límite líquido entre 30% y 44%, y plástico entre 17% y 24%, la resistencia a la penetración estándar es de 6 golpes/pie, resistencia al corte directo 2 ton/m² para cohesión y 19° Angulo de fricción interna.

Bajo los rellenos se encuentran residuales arcillosos de consistencia media a dura 6 a 22 golpes/pie, espesor promedio de 2 metros, baja plasticidad (28%<LI<48%; 16%<Lp< 25%), cohesión 4 ton/m² y ángulo de fricción 21°. Por último un nivel de arcilla, de consistencia dura a muy dura; 40 golpes/pie a rechazo, baja plasticidad (LI= 30%; Ip=17%), cohesión 3 ton/m² y ángulo de fricción 23°

Para la parte hidrológica, se obtuvieron los caudales de diseño, a partir del estudio de HIDROTEC 1998. La precipitación promedio es de 1.093 mm/año, con un máximo para el mes de octubre (130 mm) y noviembre (152 mm). El coeficiente de escorrentía para la zona urbana, es de 0.9, para vías 0.94 y para potreros 0.2. Para este estudio se utilizó la estación Vivero Venado de Oro y una microcuenca de 13.48 Ha.

La hidrogeología de la zona está condicionada por el buzamiento de los estratos y la fracturación de la arenisca presente, los cuales buzaban en sentido oeste, por lo cual este sería el sentido predominante del flujo subsuperficial, con mayor circulación en los contactos entre arcillolita y arenisca. En la zona de estudio el flujo va en sentido contrario a la pendiente topográfica, lo cual es favorable para la estabilidad de las laderas.

La presencia de suelo residual arcilloso, y la matriz arcillosa de los rellenos definen condiciones superficiales de baja permeabilidad, lo que determina presencia de agua de escorrentía en época de lluvias.

El mayor potencial sismogénico se encuentra en las fallas del piedemonte llanero. Las fallas Guayuriba y San Pedro, están muy cercanas a la capital y en especial al área de estudio (50 y 100 Km), además presentan actividad en el rango moderado –alto. Por lo anterior, se conceptuó que el barrio Ramajal está sujeto a amenaza sísmica alta.

Para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, se aplicó la metodología planteada por González 1990, en las VI jornadas geotécnicas, realizadas por la Sociedad Colombiana de Ingenieros.

La amenaza se evaluó, de tal forma que 5 variables específicas (litología, geomorfología, pendiente, usos del suelo y sistemas de drenaje) tuvieran un valor porcentual en función de su importancia y a la vez cada una de ellas fuera desglosada y cuantificada porcentualmente. La amenaza es entonces el producto del peso de la variable principal considerada por el valor porcentual de importancia dado a cada elemento de la respectiva variable considerada.

Para el análisis de estabilidad, se estableció que los problemas de estabilidad no presentan círculos de falla profundos y el material interesado corresponde al relleno y al suelo residual, en donde el principal elemento detonante es el agua. Lo anterior establece las condiciones de análisis (superficie de contacto suelo-relleno y falla no circular). Se utilizó el programa STABLE5, con los parámetros de cálculo resultantes de los ensayos de cada material, que se presentan en la Tabla 2-10. Los análisis se realizaron para condición pseudo-estática y saturada, con sismo de 0.3g. Los Factores de Seguridad fueron mayores que 1 sin sismo y menores de 1 con sismo.

<i>Tipo de Material</i>	<i>C (ton/m²)</i>	<i>φ (°)</i>	<i>Peso Unitario (ton/m³)</i>	<i>I.P. (%)</i>
Relleno	2.0	19	1.97	18
Suelo Residual	4.0	21	1.85	15
Arcillolita	3.0	23	2.03	12
Arenisca (asumido)	5	25	2.2	

Tabla 2-10. Parámetros de resistencia.

Para el análisis de vulnerabilidad, se realizó como primera actividad el inventario de viviendas e infraestructura, con estos datos y los de reubicación de viviendas suministrada por la UPES-FOPAE, se concluyó que las viviendas más vulnerables son aquellas con procesos constructivos y materiales deficientes y las ubicadas en zonas de inestabilidad. Aun así viviendas bien construidas generan inestabilidad por sobrecargas sobre el terreno. Los extremos de las cuadras presentan cambios bruscos de topografía hasta de 4 metros.

En el inventario de viviendas por vulnerabilidad se resume: 28 viviendas con vulnerabilidad baja, 33 viviendas con vulnerabilidad media, y 49 viviendas con vulnerabilidad alta (3 en proceso de reubicación, 24 reubicadas y 3 lotes vacíos)

La vulnerabilidad de la infraestructura, está relacionada con las vías, accesos y redes de acueducto y alcantarillado. En general las vías presentan susceptibilidad baja por estar afirmadas o pavimentadas, aun así su aporte de agua superficial a las laderas es muy alta. Los sistemas de acueducto y alcantarillado presentan en general una alta vulnerabilidad, debido, entre otros, a los suelos de fundación y calidad de construcción.

El riesgo se evaluó teniendo en cuenta la amenaza a la que está sujeta el área y a la vulnerabilidad de las viviendas allí localizadas. Para esto se utilizó la metodología planteada por González (1998).

Dentro de las alternativas de solución, se describe el riesgo controlable, cuando el evento amenazante puede predecirse pero sus consecuencias sólo pueden atenuarse o mitigarse, pues no se pueden manejar completamente ni técnica ni económicamente.

En general, las obras dentro de las zonas de estudio se plantean aquellas para el manejo del agua superficial: cunetas, terracedos, piedra pegada, adecuación de vías, arborización. Para las laderas se diseñaron los terracedos del costado occidental y nor-occidental.

Para la zona fuera del área de estudio, se planteó: remoción del material suelto, demolición de muro de contención averiado, perfilado de taludes y protección de los mismos y sistemas de drenaje.

2.2.7 Diseño e instalación de la instrumentación para el monitoreo y seguimiento de fenómenos de remoción en masa de los barrios Manila y Gran Colombia.

Autor: SALAZAR FERRO INGENIEROS.

Año: 2000

La zona de estudio se encuentra en los barrios Manila-Gran Colombia y corresponde a un talud inestable habitado por personas de escasos recursos. Además presenta una zona de falla activa y un talud de alta pendiente entre el río y la zona habitada. También se observa infiltración de aguas servidas y lluvias.

Geotecnia: el talud se puede describir como un coluvión con intercalaciones de arcillas y apoyado en arcillolita de la Formación Guaduas. El perfil se describe compuesto por las siguientes unidades Rellenos gravo arcillosos, arenosos y en tierra, hasta 4.9 metros. Bloques de arenisca con gravas en matriz arcillo arenosa hasta 9.8 metros. Arcillas y limos arcillosos con gravas hasta 11.5 metros. Gravas y piedras en matriz limo arcillosa hasta 12.8 metros. Lutitas descompuestas y arcillolitas

Hidráulica e Hidrología: en la parte alta del río la precipitación total promedio es de 1500 mm/año, y en la parte baja 1000 mm/año. La temperatura en promedio se encuentra entre 7.5°C y los 10°C, con máximo 22°C y mínimo de -2.5°C. La Humedad Relativa varía con respecto a la altura. Para la parte alta es del orden de 87% y 83% en la parte media y baja. Como máximo en toda la cuenca 99% y 100% y mínimos en la parte baja 26%. La dirección predominante de los vientos es Sureste, aunque condiciones extremas puede hacer que varié en dirección oeste, las velocidades medias cerca de la superficie tienen en promedio de 5.2 km/h, con máximo de 15 km/h.

Monitoreo: el control propuesto consta de inclinómetros, piezómetros, monitoreo topográfico (alineamiento horizontal, zona movimiento activo, niveletas), control

visual en zanjas de mortero, niveletas en viviendas y miras para control del nivel del río.

La zona de estudio incluye el lecho del río San Cristóbal, lo que requiere además del estudio de socavación considerar la relación del proceso con zonas aguas arriba y aguas abajo del proceso

Se consideró que debido al régimen hidrológico e hidráulico se debía considerar una socavación grande debido a una fuerte precipitación en la parte alta de la cuenca. Aguas abajo un deslizamiento del talud en estudio, podría ocasionar un taponamiento del río y una posterior avalancha en la parte baja, lo que representa riesgo relativo para los ribereños.

La inestabilidad del talud, aparte de la socavación se presenta contribución de quebradas en la parte alta del talud y de aguas servidas. Con el tiempo el proceso puede ser retrogresivo. La zona de estudio comprende un corte vial en la parte baja, lo cual pudo contribuir en la generación proceso.

El periodo de control de instrumentación es fue muy corto y además el invierno en esta zona no fue tal severo como en otros años, aunque incluyó el mes de abril. Los problemas de fugas en redes, aguas servidas y variabilidad de densidad demográfica, obligaría a que el control de estas zonas fuese constante.

Como resultado de las mediciones topográficas se determinó que en el barrio Manila se presentaron los mayores movimientos en dirección de la pendiente, con tendencia a estabilizarse al final del periodo de observación (abril). Los desplazamientos en la parte baja son considerables. En el barrio Gran Colombia, los valores de desplazamiento son menores que en el barrio Manila, pero aun son considerables. No se vieron evidencias de fallas circulares ya que no bajaron puntos en la parte alta, ni subieron los de la parte baja. Los inclinómetros muestran que se presentan movimientos superficiales en le Barrio Gran Colombia.

La relación del piezómetro con las miras guarda gran relación. Tal es el caso de la mira en Gran Colombia, que registró un aumento de un metro, sin corresponder este valor a un invierno severo. En general, en este barrio las mediciones indican que hay estabilidad desde el punto de vista de las presiones.

Las plantillas instaladas en las casas así como la inspección visual y las fotografías, indican que durante el periodo de control no existieron movimientos apreciables en este sector.

Análisis hidráulico e hidrológico: con base en los estudios para el periodo 1988 a 1998, realizados por IFCAYA e INGEOCIM para la zona, se encontró que en la quebrada La Pichosa se producen infiltraciones hacia la cuenca del río San

Cristóbal, en los barrios Manila y Gran Colombia. Además, el análisis cualitativo de los sistemas de drenaje de aguas lluvias y servidas del sector, evidencia su relación con los problemas de estabilidad.

Con relación a los caudales se concluyó que el cauce tiene capacidad suficiente, sin embargo se recomendó realizar estudios para la estimación de lluvias de diseño y caudales, para lo cual en el mes de febrero de 2000, se instaló una mira en el sector de estudio. Dicha mira incluye un elemento que permite conocer lecturas máximas.

Como el periodo de registro planteado (4 meses), no es suficiente para modelar procesos morfodinámicos y mucho menos a nivel local, se buscó verificar la relación que debe existir entre esta mira y la del Delirio. La comparación de los pares de registros, permitió de forma cualitativa, establecer la similitud del régimen Hidrológico en los dos puntos.

Aunque no se disponga la serie de caudales, a través de la lectura sistemática de la mira, se puede contar con niveles medios y máximos para la modelación de cotas de alerta.

Para la modelación de la estabilidad se utilizó el programa SLOPE/W, calculando factores de seguridad con base en el modelo de Bishop. Para crear el modelo se utilizó el perfil promedio de la zona, los parámetros obtenidos por correlaciones, según los datos de campo y los de laboratorio y superficies de falla estimadas a partir de las perforaciones y de los resultados de la instrumentación. Además se utilizaron como hipótesis: sismo 0.2 g, sin sismo y sin agua. Con estas condiciones se encontró que los Factores de Seguridad son inferiores a uno.

Sistemas de alerta: con base en comportamientos característicos y más o menos bien definidos de los instrumentos de control, para movimientos horizontales, se definieron tres sistemas de alerta (amarilla, naranja y roja), en función del movimiento de los mojones y su velocidad. Estas alertas son de carácter indicativo, ya que se supuso continuidad en las lecturas a largo plazo.

Los piezómetros definieron tres tipos de alerta, en función de las fluctuaciones de los registros con tres parámetros de referencia.

2.2.8 Estudio de zonificación de riesgos por fenómenos de remoción en masa en los barrios El Triángulo, Triángulo Alto y Corinto en la Localidad de San Cristóbal en Santa fe de Bogotá D.C.

Autor: HIDROGEOLOGÍA Y GEOTECNIA AMBIENTAL Ltda.

Año: 1999

Los barrios Triángulo, Triángulo Alto y Corinto, ocupan parte de la superficie de una contra pendiente estructural, en los cerros sur orientales de Bogotá, con procesos activos de remoción en masa y erosión.

En lo urbano, se presenta en Corinto un loteo ordenado con respecto a la pendiente, mientras que en los otros barrios el desarrollo se concentra hacia la vía de acceso. Las viviendas son de tipo estructural con y sin pórticos en la parte baja y palafitos, recuperación y prefabricadas en la parte alta.

Se aprecia laderas residuales y coluviales, en fuertes pendientes, lo cual genera procesos activos que involucran viviendas, la mayor parte de ellas inscritas en el programa de reubicación (106 familias afectadas para el año 1999).

El objeto principal del trabajo es la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por procesos de remoción en masa. Dentro del alcance, no está contemplado el análisis sísmico. Por otra parte se contempla la exploración del suelo, análisis de laboratorio; estudio geológico, geomorfológico, análisis geotécnico, procesos presentes y actividad antropogénica; identificación de zonas con característica similares para evaluar amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Recopilación y análisis de información existente: Se consultaron fuentes como el IGAC, INGEOMINAS, DPAE, IDEAM, EAAB, DAPD, estudios de INGEOCIM LTDA.

La topografía base fue a escala detallada 1:1000, destacando aspectos críticos de relieve y unidades residenciales vulnerables. Con este nivel de detalle se trabajan los demás aspectos.

Se realizó el levantamiento de procesos de remoción en masa, mediante el uso de fichas de campo. En total se levantaron 33 procesos. Para sistematizar la información se elaboró una tabla en acces. Además se registraron los procesos en un mapa 1:1000 para analizarlo con un programa SIG. El mayor porcentaje de procesos corresponde a deslizamientos traslacionales (66.7%).

Levantamiento geológico: Se presentan depósitos cuaternarios, identificados como coluvial antiguo, intermedio, reciente, nivel de flujo de suelos, nivel coluvial y nivel

de suelos arcillosos residuales. La secuencia estratigráfica se encuentra plegada, por eso su fuerte patrón de diaclasamiento. Los taludes de roca presentan fuerte diaclasamiento y alto grado de meteorización, produciendo caída de bloques.

Estudio geomorfológico: se consideró la génesis de las diferentes unidades geomorfológicas y la evolución, mediante evaluación de información existente y fotografías aéreas. Localizado sobre contra pendiente estructural, flanco occidental del sinclinal de Usme. Se identificaron geoformas agrupadas en unidades: taludes antrópicos de rocas, patio de explotación de la cantera, ladera coluvial, ladera coluvial reciente, ladera coluvial intermedia, ladera coluvial antigua, ladera estructural de roca, ladera de suelo residual, laderas cóncavas de suelo residual, ladera de flujo de suelos.

Hidrología y clima: Se buscaba describir el régimen temporal y espacial de la precipitación media anual, determinar los aguaceros de corta duración, determinación de la influencia de la precipitación como agente detonante de los procesos de remoción en masa y determinar la magnitud de la lluvia crítica y su periodo de retorno que dispara deslizamientos.

La zona presenta una precipitación de mediana intensidad y larga duración y por la poca cobertura vegetal y las pendientes fuertes casi toda se convierte en escorrentía natural, generando tiempos de concentración muy bajos.

Para el elemento clima sólo se tuvo en cuenta la precipitación, tomando la información de la estación (CO) Venado de Oro, en la cual se alcanza una precipitación promedio multianual de 1093.5 mm, siendo abril el mes más lluvioso. Con estos datos se obtuvieron las IDF para diferentes periodos de retorno y los histogramas de precipitación total y efectiva.

Se determinó la relación de precipitación crítica-duración, que dispara movimientos en masa, utilizando el estudio elaborado por INGEOCIM-UPES 1998., en donde relacionan por medio de ecuaciones la lluvia crítica, lluvia anual y duración, con lo cual halla una probabilidad de ocurrencia por precipitación. Para la zona es de 4%, concluyendo que los procesos de remoción en masa de la zona no son dependientes de la precipitación.

Uso del suelo y cobertura vegetal: viene condicionado por el clima y la topografía, y por supuesto a la intervención del hombre. Se usó la metodología del CIAF, para jerarquizar detalle (exploratorio, reconocimiento, semi-detallado, detallado). En general, la zona presenta diversos usos de suelo predominando la ocupación urbana, desordenada y sin especificaciones constructivas. En cuanto a cobertura de servicios públicos, en promedio el 85% de las viviendas cuentan con acueducto, alcantarillado y fluido eléctrico, aunque su mantenimiento sea nulo. Las

zonas verdes ocupan el 40% del área, sin embargo no son aprovechables para la recreación por sus características geográficas, uso y cobertura.

El factor antrópico pretende cuantificar los efectos sobre la ocurrencia de procesos de remoción en masa, por sobrecarga y descarga de laderas por infiltración de aguas de escorrentía y por modificación del drenaje. Para sobrecarga se realizaron inventarios de procesos de inestabilidad (rellenos y depósitos de canteras), de igual manera para la descarga (explotaciones y cortes para construcción) y para infiltración de aguas.

Este último aspecto se evaluó estableciendo áreas según la forma de abastecimiento de agua potable, de manejo de aguas sanitarias y el tipo de cobertura de las zona urbanas. Con la información obtenida se hizo un análisis paramétrico y se sectorizo de acuerdo a la afectación del medio físico por actividad, sobre las unidades del mapa geomorfológico.

Inventario de viviendas: mediante fichas de campo

Investigación del subsuelo: en afloramientos rocosos se levantaron 4 columnas estratigráficas y exploración directa por medio de 18 perforaciones además de ensayos de campo, esto debido a las características de la zona. Se llevaron acabo además ensayos de laboratorio.

Estas pruebas revelaron un patrón estructural homogéneo reflejado por familias de diaclasas definidas, planos estratigráficos homogéneos. La fase de laboratorio agrupó pruebas: LI y Lp, W, pesos unitarios, granulometría, resistencia al corte (compresión inconfiada, penetrómetro y corte directo). Los perfiles residuales como coluviales, son principalmente arcillosos de baja plasticidad, [16% a 42%], intervalos de Ip [11% hasta 29%], el peso unitario promedio de 2.05 ton/m³ y desviación estándar de 0.15ton/m³.

De corte directo se tiene que los coluviales poseen ángulos de fricción Φ [19°-25°], con cohesiones menores a 2.9 ton/m². En residuales poseen ángulos de fricción similares, pero la cohesión aumenta 2.8 ton/m².

La caracterización rocosa se realizó sobre bloques irregulares, hallando pesos unitarios y carga puntual. Para compresión inconfiada se tallaron cilindros. Se llevo a cabo también medición de resistencia al corte en planos de discontinuidad, tomando como parámetros los de ensayos hechos en otros sitios de exposición de la Formación Bogotá.

Los depósitos presentan diversidad y heterogeneidad por procesos de remoción en masa e intervención antrópica (relleno), lo que condiciona la representatividad de los datos de laboratorio. Por eso se acudió en campo al ensayo de penetración

estándar, con el fin de complementar la caracterización geotécnica de los materiales. Una vez obtenidos los registros, se validó y homogeneizó la información.

Las características geomecánicas del subsuelo del cuaternario se resumen así:

Macizo rocoso: la familia de diaclasas presentan persistencia poco continua [Prom. 1,3; 2,7; 2,9 m], espaciamiento moderado a espaciado [Prom. 0,7; 1,0; 1,1 m], abertura cerrada a ligeramente abierta [medias. 1,0; 1,2; 1,1 m], y sin relleno o relleno areno-arcilloso. La rugosidad de las paredes de las discontinuidades [ISRM V y VI] es de onda suave y onda pulida, con valores JRC entre 4 y 2. No es claro el grado de meteorización. Se clasifica el macizo entre regulares, buenos y de comportamiento homogéneo, según la clasificación GSI y RMR.

Material rocoso: compuesto por ocho niveles de arcillolita y cinco de arenisca. Las arcillolitas son grises, meteorizadas, altamente plásticas, erodables y muy susceptibles a agentes meteóricos, en paquetes de hasta 17,5 m de espesor, peso unitario 1,92 a 2,36 ton/m², humedad natural 20% a 30%, ángulo de fricción 36,7° y cohesión asumida de 3 ton/m². Las areniscas son de grano fino a medio habanas, de estratificación gruesa, bancos de hasta 10 m, demarcan divisorias de aguas, peso unitario 2,2 ton/m², resistencia a la compresión simple 750-1200 ton/m², ángulo de fricción asumido 40° y cohesión asumida de 0 ton/m².

Suelos: corresponden a depósitos de ladera recientes y rellenos heterogéneos. Los recientes compuestos por suelos arcillosos de baja plasticidad y de consistencia blanda-media ($2.6 \leq Cu \leq 4.0$ ton/m²), con espesores máximos de 4 m. Los segundos con cubierta máxima de exposición de 2 m, de materiales heterogéneos en matriz arcillosa de baja plasticidad especialmente en Corinto. Como es lógico los menores ángulos de fricción se encuentran en depósitos de cuerpos deslizados [$\Phi = 18^\circ - 20^\circ$], [$c = 0.45 - 0.85$ ton/m²].

Dentro de los agentes disparadores de los procesos de inestabilidad están la lluvia, sismo, el hombre y la erosión. Como valores de diseño se tomaron los siguientes:

Precipitación media multianual=1093 mm

Lluvia máxima mensual promedio =137.3 mm

Precipitación crítica=407.28 mm en 20 días y Pr 20 años.

Con estos datos se obtuvo una probabilidad de ocurrencia de 25%.

El efecto sísmico se evaluó con base en el estudio de Micro Zonificación Sísmica de Bogotá, y en la Curva de Recurrencia de Aceleraciones para Bogotá del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, 1998.

Evaluación de estabilidad: comienza por la zonificación geotécnica, delimitando zonas homogéneas a partir de unidades geomorfológicas que condensan unidades de ladera con materiales similares, condiciones de drenaje, tipos de procesos y morfometría semejante, enfocándose en las propiedades físico-mecánicas de los materiales propios de cada una. Se dividió la vertiente en treinta y cuatro zonas homogéneas, tres de ellas en áreas planas y el resto en pendiente.

La información recopilada incluye para cada zona homogénea, la unidad geomorfológica asociada, el tipo de material, la sección y la ladera de análisis, los mecanismos de falla, el espectro de variación de los parámetros, el espesor de la masa potencial movilizada y el ángulo del plano de falla.

La primera etapa del análisis de estabilidad se enfocó al análisis de los modos de falla a lo largo de los planos de debilidad estructural de los macizos rocosos y a la determinación del modo probable de falla, a partir del análisis cinemático. Por tanto, la relación geométrica entre las discontinuidades y la orientación del talud determinará si parte de él está libre de deslizarse o caer.

Para el análisis cinemático, se tomo como ángulo de fricción de los planos de discontinuidad el ángulo de fricción básico de la arenisca a lo largo del plano de diaclasa D3 ($\phi = 30^\circ$), por ser este el más desfavorable para los taludes. En una segunda etapa, se modeló con equilibrio límite para cada zona homogénea los modos de falla observados en campo.

Para los modelos estáticos, se realizaron diferentes corridas con el fin de estructurar un análisis paramétrico y de sensibilidad a partir de los valores mecánicos obtenidos de laboratorio y pruebas de campo, para tener una percepción tanto del espectro probable de variación de parámetros de resistencia, como el grado de estabilidad.

En el análisis cinemático se evaluaron los modos probables de falla para múltiples orientaciones de las laderas naturales entalladas en roca y zonas homogéneas. Bajo las condiciones geométricas mencionadas para los taludes y del patrón estructural, el análisis cinemático concluye que para la mayor parte de las laderas no existe posibilidad de falla planar o en cuña.

Lo anterior se fundamenta en que algunas de las laderas no se encuentran paralelas a las familias promedio de discontinuidades; los buzamientos de los planos estructurales, desfavorablemente orientados son superiores a las

inclinaciones de las laderas; los azimuts de buzamiento de las cuñas muestran variaciones superiores a los 90° con relación a los azimuts de buzamiento de las superficies libres y el buzamiento de las cuñas potencialmente inestables, es menor tanto a la inclinación de los cortes como el ángulo de fricción interna de los planos de movilización. Aun así, en el barrio Corinto y El Triángulo se pueden presentar fallas en cuña. Por otro lado, la falla por volteo está restringida y se concentra sólo a unos pocos taludes.

En cuanto al análisis estático se estimó el factor de seguridad expresado en probabilidad de falla, de los taludes potencialmente inestables y a la vez se realizó un análisis de sensibilidad. Para esto se definieron 18 secciones de análisis, para evaluar 29 laderas, asumiendo que el grado de estabilidad de cada una de ellas es equivalente para la región a la cual pertenece. Luego se determinaron los parámetros de evaluación y se corrieron con PCSTABLE 6. Este proceso se realizó también para zonas estables o intervenidas, buscando encontrar parámetros críticos. Los resultados en general muestran que los factores de seguridad son bajos en condición de lámina de agua constante y no necesariamente con sismo.

Para la zonificación de amenaza, para la escala de trabajo (1:1000) se empleó el método cuantitativo o determinístico aplicado por Hoek (1996), el cual se apoya en Montecarlo y en el Método de Estimativos Puntuales (PEM) propuesto por Rosenblueth (1975). Dentro de los insumos para implementar la metodología están los tipos de mecanismos de falla y las funciones de probabilidad de las variables involucradas, y así determinar las curvas de probabilidad para cada uno de los taludes de estudio. Con estas se elaboraron los mapas de amenaza.

Las variables aleatorias para los mecanismos de rotura seleccionados, están relacionados con los cambios espaciales de los materiales geológicos, parámetros de resistencia al corte y con las condiciones ambientales. Cada una de ellas fue descrita por una función de probabilidad a partir de una media y una desviación estándar (20% del valor promedio), resultando una desviación de 2° a 6° para ángulos de fricción y 0.1 a 0.7 ton/m² para la cohesión. Para la profundidad de agua se ajustó la función a una exponencial, así, las menores profundidades poseen la más alta posibilidad de acontecer y para sismo se recurrió a la curva de recurrencia sísmica de Colombia. Para el método de Hoek, se evalúan $\mu_x - \sigma_x$ y $\mu_x + \sigma_x$ para factor de seguridad o para escenarios extremos C_{\min} , Φ_{\min} , C_{\max} , Φ_{\max} e individual o conjunta de los detonantes.

Con los Factores de Seguridad obtenidos se calcularon las curvas de densidad y con ellas la probabilidad de falla. Se puede concluir que los resultados obtenidos con el Método de Estimativos Puntuales difieren con lo observado en campo ya

que subestima la probabilidad condicional. Por esta razón se trabajo con Montecarlo.

Para determinar la probabilidad de falla para cualquier ladera, según el tipo de proceso de remoción en masa, conocido su factor de seguridad, se estimó la mejor correlación entre los dos componentes (Pf y Fs), denominada curva general de probabilidad de falla, la cual fue obtenida calculando el factor de seguridad de los taludes con el valor promedio de las variables aleatorias (c, Φ , a y hw) al que se le asignó la probabilidad condicional en el ambiente actual. Esto para tipo de proceso y tiempo de exposición.

Con los resultados anteriores, la composición estratigráfica y geotécnica y las distancias de viaje de las masas potenciales, se obtuvieron los mapas de zonificación por amenaza actual y a 10 años, quedando dividida en tres categorías: alta, media y baja, a partir del factor de seguridad adaptando las categorías de amenaza relativa del Estudio de Zonificación de Santa Fe de Bogotá, así:

FS	Categoría de Amenaza
>1.7	Baja
1.1- 1.7	Media
<1.1	Alta

Tabla 2-11. Factores de seguridad.

Concluyendo, los procesos de estabilidad no involucran espesores de material mayores a 4 metros, con velocidad lenta y daños moderados. Alrededor del 50% del área de estudio está dentro de amenaza alta. El manejo de los barrios Corinto y Triángulo Alto, se hace complicado por la densidad de construcciones, habitantes y dificultad de acceso. Como normalmente los procesos son disparados por la combinación de aguas lluvias y vertimientos domésticos, la solución radica en el control de esta situación, construyendo sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario. Además se recomienda la pavimentación de la vía de acceso y la construcción de obras de arte para evitar infiltración.

Evaluación de vulnerabilidad: esta se realiza con base en la encuesta de cada vivienda, estudiando la componente física y la social. Para la componente física el análisis fue semicuantitativo con adaptaciones de la de Leone (1996), referida a la resistencia de los elementos, a la asignación del grado de exposición y a la matriz

de daño elaborada con base en las anteriores. Para lo social el análisis es cualitativo y se basa en la información de los formularios.

Aunque la capacidad de respuesta de la comunidad involucra aspectos como la organización barrial y local, ya que son estas las encargadas de actuar como intermediarios entre la comunidad y el distrito, para dar a conocer los procedimientos a seguir ante la ocurrencia de un evento, sin embargo la eficacia e interacción entre entidades no fue contemplada. Las condiciones relevantes a este aspecto se resumen así

Percepción del peligro: la comunidad reconoce el peligro, sin embargo el proceso de reasentamiento se ve como oportunidad de dinero y cambio de calidad de vida llegando a la gente a agravar los procesos.

Organizaciones cívicas: aunque todos los barrios cuentan con JAC, aunque ante procesos se manejan intereses individuales. Las JAC son irrelevantes ante una emergencia por no contar con las herramientas necesarias.

Capacidad económica de los pobladores: se puede catalogar como baja, en promedio \$251000, para el año 1999 y cinco personas por núcleo familiar, esto no permite recuperación una rápida.

Cobertura de servicios: para 1999, la carencia es 76% de agua potable, 81% alcantarillado, 26% luz eléctrica y 85% en red telefónica, vías sin pavimentar y gas natural nulo. Esto conduce a la piratería, y a la disposición de residuos en las calles y laderas.

Tipología de las viviendas: este aspecto desde el punto de vista social indica la calidad de vida de los habitantes. Estructuralmente 148 unidades se consideran malas, 130 regular y 120 de buena calidad constructiva. La mayoría de los hogares vive al menos hace 6 años en las viviendas, mejorando y adecuándolas.

Al considerar los tópicos anteriores es claro que las condiciones difíciles de vulnerabilidad socioeconómica son similares para Corinto y Triángulo Alto, por la incapacidad de la comunidad de sobrellevar un desastre y de recuperar su condición de vida actual.

Para la vulnerabilidad física, se expresa como una medida porcentual de los costos de las avenidas ocasionadas por un agente destructor, en este caso deslizamientos. El porcentaje del perjuicio sobre el inmueble, definido con ID, índice de daño, es proporcional a la exposición de los elementos e inversamente proporcional a su resistencia.

La exposición es importante si los elementos están dentro de la zona de influencia del deslizamiento. Así todo movimiento está compuesto por tres zonas: zona de influencia directa (área del movimiento), zona de influencia indirecta (invasión y afectación), y zona de influencia nula (sin afectación), determinadas con la evaluación geotécnica y la clasificación de los deslizamientos.

La resistencia (IR), como dependiente de la vulnerabilidad física, en función del sistema estructural general de las viviendas, aunque también se tipificó la cubierta, placa de piso, sistema estructural y cobertura. En general la cubierta es de zinc o recuperación, estructura de techo en madera, estructuras de piso en madera, concreto pobre o tierra. Las viviendas fueron discriminadas en: palafitos y recuperación, prefabricados, vivienda en mampostería, vivienda hasta dos niveles.

Intensidad e índice de daños (InD e ID), los perjuicios que se producirán sobre las unidades, están condicionados por la exposición y la resistencia. Estos factores se registran en la matriz de intensidad de daño, cuantificada como: muy baja (I), hasta muy alta (V) y se formula con un índice de daño, que representa el porcentaje de daños en la vivienda.

El costo de los daños, VD, en pesos, se totaliza al sintetizar el Valor Inicial del Inmueble, VII (pesos), porcentaje de área de afectación PAA e ID, así:

$$VD = VII * PAA * ID \quad [2-1]$$

Índice de Vulnerabilidad Física. Al comparar el valor de daño con respecto al valor inicial del predio se obtiene el índice de vulnerabilidad física, IVF, siendo la ecuación resultante:

$$IVF = VD / VII \quad [2-2]$$

En esta se observa que mientras mayores sean los daños, la vulnerabilidad también lo será. Con el análisis de frecuencia de índice y de la cualificación de la vulnerabilidad con base en los siguientes criterios

<i>IVF</i>	<i>Categoría de vulnerabilidad</i>
0 – 0.375	Baja
0.375 – 0.625	Media
0.625 - 1	Alta

Tabla 2-12. Categorías de vulnerabilidad.

Se concluye que la vulnerabilidad de las unidades físicas es más crítica en El Triángulo donde el 35% se ubica en áreas de vulnerabilidad baja (*sic*), mientras que este porcentaje disminuye notoriamente en Triángulo Alto (2%) y en Corinto (19%).

Evaluación y análisis de riesgos por remoción en masa: se realiza la zonificación de riesgo del área de estudio (amenaza vs vulnerabilidad), para determinar las consecuencias físicas y económicas asociadas a los eventos. Se utilizó el modelo de decisión probabilístico para selección entre varias alternativas

El riesgo actual, incurrido en una zona o elemento frente a una solicitud determinada, se puede expresar al combinar la probabilidad de ocurrencia de la solicitud (amenaza actual-Pf) con las pérdidas potenciales. Para este trabajo las pérdidas corresponden a las pérdidas directas en viviendas y enseres, las cuales se pueden calcular multiplicando los costos de capital por el índice de vulnerabilidad física, así:

$$\text{Riesgo} = Pf * VD \quad [2-3]$$

Para obviar el subjetivo contexto de los costos de capital, no comparables globalmente (diferentes para cada monto de inversión de cada vivienda), se trabajó con el índice de riesgo. Obviando los costos de capital se tiene:

$$IRA = Pf * IVF = Pf * VD / VII = Pf * (VII * PAA * ID) / VII = Pf * PAA + ID \quad [2-4]$$

Entonces el Índice de Riesgo Actual, corresponde a un valor entre 0 y 1, donde los menores niveles de riesgo son cantidades cercanas a cero. Aun cuando el IRA tiene como valor superior la unidad, la pérdida de la mitad de una vivienda puede asumirse como crítica. Concluyendo que los intervalos de categorización no podrían expresarse de manera similar a las de los límites anteriores, adoptaron como intervalos de cualificación de las pérdidas probables, así

IRA	Categoría de riesgo actual
< 0.15	Bajo
0.15 – 0.25	Medio
> 0.25	Alto

Tabla 2-13. Categorías de riesgo.

Concluyendo, los barrios El Triángulo y Corinto presentan proporcionalmente mayor número de viviendas en zonas de alto riesgo (31% y 34%), mientras en El Triángulo Alto sólo el 9%. No obstante, en Corinto, únicamente el 20% de las unidades físicas se encuentra localizada en la zona de riesgo bajo, y en El Triángulo y Triángulo Alto estos porcentajes son cercanos al 50%.

La principal medida preventiva consiste en la restricción del uso del suelo que se debe adelantar en las áreas no urbanizadas. El plan de medidas tiene como únicos objetivos permitir la consolidación ordenada de los barrios y mejora la calidad de vida de los habitantes.

Algunos de los proyectos, como es el caso de la construcción de los sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario y la rectificación y pavimentación vial.

2.2.9 Estudio de amenaza por inundación del Río Fucha en las localidades de San Cristóbal, Kennedy y Fontibón y recomendaciones de medidas de mitigación

Autor: HIDROCONDULTA, Ltda

Año: 1999

El Río San Cristóbal hace parte del sistema San Cristóbal-San Francisco o Fucha y nace como río Palo Blanco en el páramo Cruz Verde en la cota 3600 msnm, al cual confluyen un gran número de quebradas menores, entre ellas las quebradas Corraleja, La Úpatá, de la Osa, La calera-La Cabaña y el Charcal. Luego de la confluencia de esta última el río toma el nombre de San Cristóbal, en proximidades de la planta de tratamiento Vitelma. Desde la Carrera Séptima el Río se encuentra canalizado.

La zona de estudio, identificada en el informe final como la parta alta del Río San Cristóbal, se caracteriza por un alto índice de ocupación en la zona de ronda en la zona urbana, la obstrucción del cauce con residuos sólidos y el vertido incontrolado de aguas residuales favoreciendo la inestabilidad del cauce. Se hace mención particular de los sectores Laureles y Santa Cecilia.

Al río también son vertidas las aguas residuales de las zonas urbanizadas próximas, cuyos flujos altamente concentrados producen socavación, principalmente por la alta energía de los flujos de creciente; en ocasiones se construyen muros en gaviones como medidas correctivas, los cuales reducen la

sección transversal aumentando la velocidad, generando la necesidad de protección adicional con enrocados. Se identificaron en la parte baja del sector, antes de llegar a la zona canalizada, diques transversales que han funcionado bien como estructuras de retención de sedimentos.

Desde el punto de vista geológico, se identifican en la zona de decantación del Río, en el costado suroccidental de la Loma El Caracol, rocas sedimentarias pertenecientes al Grupo Guadalupe y a las Formaciones Guaduas, Cacho y Bogotá. En la zona del cauce y del valle de inundación las unidades de roca están cubiertas por depósitos recientes, dentro de los cuales se destacan los depósitos de origen fluvio-torrencial, terrazas asociadas a la dinámica del río, cono aluvial del río y masas inestables.

La descripción del cono aluvial del Río San Cristóbal incluye la presencia de depósitos de dos eventos de magnitud considerable. Un primer evento es responsable del transporte y acumulación de un potente depósito de grandes bloques, cantos y gravas de arenisca cuarzosa, subredondeados; la matriz es preferentemente areno limosa, de color gris claro con manchas amarillas, esta matriz es fácilmente erodable. El segundo evento es de menor magnitud y responsable del transporte y acumulación de un horizonte de arcilla limosa, de color habano a carmelita rojizo, erodable, el espesor de este horizonte oscila entre 1.5 y 2.0 m, pero localmente puede ser muy pequeño.

A lo largo de cauce se identificaron algunos procesos de inestabilidad que se localizaron con relación a la posición del tanque de decantación del acueducto.

Entre estos procesos se destacan los siguientes:

K0+330-K0+450 (abscisas con cero en el centro del tanque de decantación), en la margen izquierda del río se presenta un deslizamiento activo, complejo, retrogresivo en arcillolitas meteorizadas de la formación Guaduas, y materiales del depósito fluvio-torrencial, con un área estimada en 2 Ha y profundidad de 4 m.

Como causa se propone el flujo de aguas subterráneas que mantiene la arcillolita saturada.

K0+450-K1+100, este sector corresponde a la vecindad del barrio Laureles con el río. El barrio está construido sobre los depósitos de terrazas, el fluvio-torrencial y la ronda del río. Las principales manifestaciones de inestabilidad se ubican sobre la margen izquierda y están relacionadas con la saturación y erosión causada sobre los depósitos a causa del vertimiento de aguas residuales. Se menciona que este deslizamiento podría represar el río.

K1+200-k1+230, en la margen izquierda se presenta un deslizamiento que amenaza algunas casas en la parte superior. El movimiento tiene un ancho medio de 30m y altura 15m, y fue provocado por el vertimiento incontrolado de aguas residuales, la masa inestable está compuesta por material fluviotorrencial y arcillolitas meteorizadas de la Formación Guaduas. Sobre la margen izquierda, de la desembocadura de la quebrada Aguas Claras o La Pichosa, hacia aguas arriba, se presenta un deslizamiento activo sobre el fluviotorrencial, que amenaza las viviendas hacia arriba y hacia abajo del movimiento.

K1+400-K3+250, este tramo va sobre el depósito de cono aluvial, y en él se identifican procesos de erosión fluvial, entre los que se destacan uno en el puente frente al Instituto de Niños Ciegos, el cual está socavando su estribo izquierdo, en la margen izquierda aguas debajo de este puente hay unas viviendas sobre el borde del río, una de las cuales fue parcialmente destruida por la dinámica del río sobre las márgenes del cauce se presenta erosión laminar.

En el estribo izquierdo del puente sobre la carera 6 Este está siendo afectado por socavación profundo. Hacia aguas debajo de este punto se reportan a lo largo de las márgenes varios procesos de erosión particularmente en las entregas de obras de conducción como alcantarillas y en estructuras de contención de gaviones.

2.2.10 Estudio Geotécnico detallado del Barrio Moralba

Autor: INGEOMINAS

Año: 1995

El estudio fue elaborado dentro del marco del Convenio Interadministrativo 017 de diciembre de 1995, suscrito entre el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, la Empresa de Energía de Bogotá e Ingeominas.

La cobertura geográfica del estudio incluyó un área al costado Norte del Barrio Quindío, sobre la margen izquierda de la vía que conduce a la Cantera El Zuque, en la parte baja del barrio Moralba, específicamente en la parte baja de la Escuela del mismo nombre.

El objetivo del estudio era el diseño de las obras de mitigación tendientes a solucionar el problema de estabilidad del sector, para lo cual se usó una base cartográfica en escala 1:1000.

En relación con la componente geológica del estudio, se puede mencionar que en la zona afloran rocas de la Formación Bogotá, Conjunto Superior, la cual

morfológicamente corresponde a una ladera en contrapendiente donde los estratos tienen una orientación N15E, buzando 40SE. Los depósitos recientes fueron divididos en tres: depósitos de suelo residual, depósitos de coluvión y depósitos de estériles.

El programa de exploración consistió en la ejecución de tres sondeos alcanzando profundidades de 9.33 m, 9.17 m y 5.0m. A las muestras recuperadas se les realizaron ensayos de clasificación, determinación del peso unitario, humedad natural y compresión inconfiada.

Los parámetros geotécnicos encontrados como resultado de los ensayos de campo y laboratorio realizados, se resumen en la Tabla 2-14.

<i>Tipo de Material</i>	<i>Peso Unitario (ton/m³)</i>	<i>Humedad Natural (%)</i>	<i>L.L. (%)</i>	<i>I.P. (%)</i>	<i>Nspt</i>
Relleno limo arcilloso					N = 8
Arcilla de baja plasticidad (CL) de color gris o café	1.97 – 2.29	13.6 – 27.4	37.4 – 47.1	15.6 - 22	
Arcillolita meteorizada, de color gris o café	2.27 – 2.31	3 – 11.3	34.8	18.2	30

Tabla 2-14. Parámetros geotécnicos estudio geotécnico detallado del Barrio Moralba.

En el estudio no se encontraron datos de parámetros geotécnicos efectivos.

Por otra parte, se realizó un análisis hidrológico para definir el caudal de diseño de las obras de drenaje propuestas. Para ello se utilizaron datos de la Estación El Delirio y las curvas IDF de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

2.2.11 Estudio básico para la conformación de un parque minero industrial para el ordenamiento y desarrollo de la actividad extractiva y transformadora de minerales arcillosos con fines a la desmarginalización de barrios del Distrito Capital

Autor: INGEOMINAS

Año: 2000.

En febrero de 2000, INGEOMINAS hizo entrega del estudio contratado por el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, DAMA, el cual contó además con el apoyo del Proyecto de cooperación entre el gobierno Alemán KWF – GTZ, el Distrito Capital y el Gobierno Colombiano.

El estudio a escala 1:25.000, tuvo como objetivo fundamental el de identificar diferentes alternativas que permitieran reordenar una porción de la actividad relacionada con la explotación y transformación de las arcillas en un parque minero industrial, realizando un análisis que incluye la evaluación y contraste del potencial de los diferentes recursos naturales existentes en el área (minero, forestal, hídrico y suelos), así como sus restricciones y amenazas, todo ello a la luz del posible impacto ambiental y socioeconómico que tal ordenamiento pudiera generar.

El área del estudio realizado fue fraccionada en cuatro zonas, las zonas B, C y D localizadas dentro del perímetro urbano del Distrito Capital y la Zona A ubicada en la parte rural del municipio de Soacha, más específicamente en las veredas de Fusunga, Alto de la Cabra y Romeral.

La zona D del estudio, corresponde a una franja delgada de orientación E-W, dentro de la localidad de San Cristóbal (Barrios El Triángulo, Antenas, Canadá, Ramajal, Los Alpes y La Colmena, entre otros)

Entendiendo lo mencionado en relación con la escala del estudio del parque minero ambiental, descrita su cobertura y a sabiendas que ésta sólo coincide en parte con el área que ocupa el presente estudio, se realizó la revisión del caso encontrando la información de referencia, para la Zona D, que se presenta a continuación.

- Mapa de Catastro e Inventario Minero: existen frentes de explotación de arcillas.
- Mapa geológico: se describen las siguientes unidades o formaciones: Formación Labor (Ksgl), Depósitos de Terraza Alta (Qta), Formación Chipaque (Ksch), Formación Plaeners (Ksgp), Formación Arenisca Dura

(Ksgd), Formación Arenisca Tierna (Ksgt), Formación Bogotá, Formación Cacho, Depósitos aluviales (Qal), Depósitos fluvioglaciares (Qflg), Depósitos de coluvión (Qc).

- Mapa de Unidades Geomorfológicas: depósitos de pendiente (Qdp), Laderas de remoción y acumulación (U-II), Laderas estructurales (U-I) y Montañas denudacionales (U-III).
- Mapa de erosión y procesos de remoción en masa: se encuentran cartografiados procesos como Zonas de explotación minera, Corona de deslizamiento, erosión laminar, socavación, surcos, reptación, flujo de lodos, terracetos, deslizamiento activo, deslizamiento inactivo.
- Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra: las unidades presentes en la Zona D son descritas como: Tierras agrícolas con limitaciones por suelos y climas (Zona III-sc), Tierras de preservación y/o conservación (Zona VIII).
- Mapa de Evapotranspiración anual potencial: la zona de estudio se encuentra dentro de las isóneas de evapotranspiración de 950mm y 1050mm.

Además de lo anterior, el documento contiene algunos datos de demografía de la Localidad de San Cristóbal, trata la problemática minero ambiental asociada con el aprovechamiento de arcillas en la Sabana de Bogotá, aspectos socioeconómicos de las zonas de estudio y hace una descripción de la industria minera de la arcilla.

2.2.12 Estudio de riesgo por fenómenos de remoción en masa del proyecto Parque Residencial San Jerónimo del Yuste

Autor: INGENIERÍA y GEOTECNIA Ltda.

Año: 2001.

El estudio plantea como objetivo general la evaluación de procesos de remoción en masa y establecer las medias de estabilización de laderas para la construcción de la denominada urbanización San Jerónimo de Yuste a cargo de la Caja de Compensación Familiar COMPENSAR, en un predio localizado al sur oriente de Bogotá, en la Localidad de San Cristóbal, barrio San Cristóbal Alto.

El predio es de aproximadamente 27.0 Hectáreas dispuesto en dos globos de forma irregular; el primero limita por el occidente con la quebrada El Triángulo, por el norte con el Camino de Oriente, por el oriente con la quebrada Pilar y el camino a Ubaque y por el sur con el límite de servicios de Bogotá; el segundo limita por el occidente con la quebrada Aguas Claras y el camino a Ubaque, por el nororiente con el barrio Montecarlo y por el sur con el límite de servicios de Bogotá.

La topografía del predio es en general ondulada y con la parte central escarpada por efecto de la cuchilla del Yuste que lo divide. Al occidente de la cuchilla hubo explotación de materiales: areniscas y arcillolitas, lo que dejó al terreno en condiciones marginales de estabilidad. El terreno del predio está conformado por los materiales de las Formaciones Bogotá, Cacho y Guaduas y depósitos fluvio-glaciales y antrópicos principalmente; la cuchilla está formada por las areniscas de la Formación Cacho.

Alrededor del predio existen barrios de origen informal donde se encuentran viviendas de calidad variable, algunas de ellas averiadas por eventos naturales tales como avalanchas e inundaciones desarrolladas por las quebradas Aguas Claras y Pilar, principalmente; las viviendas averiadas se encuentran dentro de la ronda de las quebradas. El proyecto contempló una adecuación del terreno mediante cortes y algunos terraplenes, de manera que se tengan plataformas y taludes que permitan el emplazamiento de las edificaciones y se garantice su estabilidad.

La Urbanización Parque Residencial San Jerónimo de Yuste quedará en la parte inferior de la antigua finca El Yuste, situada sobre el flanco izquierdo de la cuenca del río San Cristóbal en el piedemonte de los cerros surorientales de la ciudad de Bogotá, entre las coordenadas 96.206 y 97.025 Norte y 100.250 y 101.056 Este del sistema Bogotá, con origen 100.000 N 100.000 E en el Observatorio Astronómico (Carrera 8 con Calle 8), al cual se llega por la Carretera a Oriente (antigua vía a Villavicencio) o por la calle 11 Sur.

Se menciona en cuanto a la geomorfología, geología y a los procesos denudativos imperantes en el pasado geológico reciente, la disposición actual de las formas del terreno es el resultado de una intensa actividad antrópica, centrada en la explotación de material arcilloso para la fabricación de tubos y la posterior reconformación de los terrenos mediante el relleno con material de desecho de los terrenos aledaños a los frentes de explotación.

La zona donde se construirá la urbanización se encuentran como drenajes naturales las quebradas Aguas Claras (La Pichosa), Pilar y El Triángulo que bañan terrenos de los barrios Santa Cecilia, Gran Colombia y Montecarlo en el sector Suroccidental de Bogotá. Son tributarias de la cuenca alta del río San Cristóbal.

Son quebradas de fuerte pendiente, con alta capacidad de producir socavación, atacar las márgenes y arrastrar material sólido.

La quebrada La Pichosa nace en el Cerro El Zuque, a una altura de 3500 m.s.n.m y drena un área de 1.46 km². Recorre una longitud de 3.13 Km hasta su desembocadura, con una pendiente media del 17.3 %. En su tramo final se conoce como Quebrada Aguas Claras. La quebrada Pilar de acuerdo con el plano del IGAC nace al norte de la anterior, a la cota 3000 m.s.n.m., transcurre paralela a la Quebrada La Pichosa y tiene un área vertiente de 0.35 km² hasta su desembocadura en la quebrada El Triángulo. Transcurre en una longitud de 1.6 Km, con una pendiente media del 16.8 %. Debido a movimientos de tierra efectuados en el predio fue modificada la cuenca de esta corriente y desviada su parte alta a la cuenca de la Quebrada Aguas Claras. La Quebrada Triángulo nace en el sector del mismo nombre, al norte de la anterior, a la cota 3000 m.s.n.m. Drena un área de 0.48 km² y transcurre con una longitud de 1.33 Km, y pendiente media del 22 %.

El rendimiento medio anual de las quebradas es de 15.2 lps/km². Los caudales medios anuales estimados son los siguientes: Aguas Claras 22.2 lps, Pilar 5.2 lps y El Triángulo 7.3 lps.

Los caudales de estiaje son muy bajos y en períodos críticos las quebradas se secan. La variación temporal de los caudales medios mensuales es bimodal, y sigue la misma tendencia de la precipitación, con máximos en Abril, Mayo, Octubre y Noviembre, y mínimos en Enero, Julio y Agosto.

Los valores obtenidos se presentan de los picos de creciente individuales para frecuencias de 25 y 100 años en las desembocaduras de las quebradas son los presentado en la Tabla 2-15:

QUEBRADA	Q 25 AÑOS	Q 100 AÑOS
Aguas Claras (La Pichosa)	8.4 m ³ /seg	10.4 m ³ /seg
Pilar	1.9 m ³ /seg	2.3 m ³ /seg
El Triángulo	3.1 m ³ /seg	3.8 m ³ /seg

Tabla 2-15. Caudales.

El sector del proyecto se encuentra cerca de la traza de dos fallas geológicas importantes, relativamente recientes, primero la falla de Bogotá, la cual transcurre al oriente del predio a unos 500 m y marca el borde de los cerros; esta falla afectó los depósitos cretáceos y terciarios y es la responsable de la inclinación de los estratos de las formaciones Bogotá y Cacho, que afloran en el predio; aunque más al sur se encuentran afectados los estratos de las formaciones La Regadera y Usme. Esta situación obedece a que la falla se presentó después de la formación de estos depósitos, lo cual nos indica una edad menor de 30 millones de años.

La otra falla es la de San Cristóbal, la cual tiene una orientación NW-SE y en el sector de estudio pasa por la parte inferior de la Quebrada Pilar y luego sigue al oriente del camino de Ubaque, y desplaza unos 100 m, la traza de la Falla de Bogotá, lo que indica que la falla de San Cristóbal es posterior, posiblemente tenga una edad de 5 millones de años.

No se encontraron evidencias de la falla en los depósitos fluvio-glaciales que la cubren, lo que lleva a concluir que no se ha reactivado durante el cuaternario (último millón de años). De acuerdo con el estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá y el decreto 074 de 2001, el sector del predio se encuentra dentro de la zona 1 A: cerros orientales y el extremo Nor-Oriental del predio se encuentra a más de 600 metros del límite con la zona 5 A: terrazas y conos orientales.

En la cuenca de la Quebrada Aguas Claras (La Pichosa) se tienen antecedentes de avalanchas, siendo la última en 1994, la cual afectó algunas viviendas de la parte baja de la cuenca; los materiales arrastrados por la avalancha fueron escombros que se habían dispuesto en las márgenes de la quebrada, obstruyendo su cauce, especialmente en la parte baja de la cuenca, donde se había efectuado la urbanización, la cual se inició a comienzos de la década del 50.

Un factor que ha contribuido a la inestabilidad de algunas laderas es la explotación de materiales térreos, la cual en la región es anterior a 1940, época en la cual abundaban los chircales y las canteras. En el predio de San Jerónimo de Yuste esta actividad se inició a mediados de la década del 50, cuando se comenzaron a explotar las areniscas del Cacho, que conforman la cuchilla del Yuste y las arcillas de la Formación Bogotá. Asociado con esta actividad se presentaron deslizamientos, especialmente de roca en la cuchilla de Yuste.

El predio en que proyecta construirse la urbanización ha sido utilizado tanto para la explotación de arcillas, especialmente hacia el extremo occidental del lote entre la quebrada El Triángulo y el filo Yuste, como para la explotación maderera mediante el cultivo de bosques de eucalipto; actualmente las arcillas son explotadas 500.0 m al sur fuera del área del proyecto, en la parte alta de la cuenca de la quebrada Pilar.

Además de estos procesos de remoción en masa se encontraron evidencias de avalancha a lo largo de la quebrada Pilar en fotografías aéreas de 1945, proceso al que se le puede asociar un período de recurrencia superior a 60 años debido a que en las fotografías de años posteriores no se observaron rastros de nuevos episodios.

Eventualmente, también puede generarse avalancha a lo largo de la quebrada Aguas Claras (o La Pichosa) si se permite la obstrucción del cauce con ramas o materiales de excavación.

Finalmente, y debido a las características estructurales de las rocas que conforman el filo Yuste (arenitas fracturadas que presentan alto grado de buzamiento) y a la geometría final del talud, podrían desprenderse y resbalar algunos bloques sueltos durante movimientos telúricos fuertes y “cortar” los edificios de la base del talud.

Sin embargo, se considera que la población adyacente al área de interés se encuentra expuesta a problemas de inundaciones y eventuales avalanchas generadas a lo largo de los cauces sobre los cuales se encuentra; sin embargo, debido a que en la gran mayoría de los predios que conforman las márgenes de dichos cauces la construcción no llega hasta el borde, se favorece la condición de seguridad de los pobladores y por lo tanto ante la eventualidad de una creciente del cauce, la afectación estará prácticamente limitada al lote vacío de cada predio sin ocasionar pérdidas económicas representativas.

Localmente también puede presentarse socavación y deslizamientos sobre las márgenes de las quebradas, y hundimientos del terreno; igualmente, el manejo inadecuado de aguas servidas y aguas lluvias o la cercanía de edificaciones a los cauces puede ocasionar problemas de filtración de agua y daños por humedad.

Fuera del predio de COMPENSAR, aunque el 45% de las viviendas encuestadas pueden resultar afectadas por avalanchas o inundación, sólo en el 11% de los casos los habitantes declararon haber resultado afectados por crecientes inusuales del caudal de las quebradas, ocasionadas principalmente por el taponamiento del cauce con ramas secas, troncos o basuras.

Antiguamente, el agua de la quebrada El Triángulo era empleada para el consumo de quienes habitaban la zona (por lo menos 20 años atrás); a medida que se fue poblando la parte alta de la cuenca, el agua fue contaminándose por el vertimiento de las aguas residuales de estos nuevos barrios, hasta el punto en que hoy en día el agua que corre por el cauce se ha convertido en un problema ambiental en el sector especialmente por el mal olor que emana y por el favorecimiento en la proliferación de plagas.

En la Quebrada el Pilar antiguamente presentaba flujo permanente, pero debido a la intervención en la parte alta de la cuenca el régimen cambió a intermitente y se convirtió en un cauce para el drenaje de aguas lluvias.

En la Quebrada Aguas Claras (o La Pichosa), durante la evaluación de fotografías aéreas antiguas, se encontró evidencia de avalancha en esta quebrada en la información de 1940. Durante el recorrido de las viviendas aledañas al cauce de esta quebrada se tuvo conocimiento de una inundación ocurrida hace poco más de 5 años (ningún habitante precisó sobre la fecha del suceso) producida por el taponamiento del cauce con ramas y troncos luego de un proceso intensivo de explotación maderera. Dentro de los efectos de esta inundación una persona y dos cerdos perdieron la vida.

En las viviendas evaluadas se encontraron muy pocas edificaciones con daños causados por la acción de la quebrada, excepto en las habitaciones construidas en la parte posterior, muy cerca al borde de la margen izquierda (la margen derecha se encuentra prácticamente deshabitada); dichos daños han sido causados por problemas de reptamiento del material que las conforman.

Igual que a lo largo de las dos quebradas mencionadas con anterioridad, la parte afectada de las viviendas se encuentra dentro de la zona de protección del cauce, demarcado recientemente por la EAAB.

El barrio San Cristóbal Sur parte alta corresponde al estrato 2, el cual posee un buen cubrimiento de servicios públicos legales (acueducto, alcantarillado, energía eléctrica, alumbrado público, teléfono y calles pavimentadas). El 83% de la población declaró recibir agua potable en forma legal (con contador de la EAAB), mientras que casi el 30% dijo no contar con sistema de alcantarillado debido a la diferencia de nivel entre la calle (bajo la cual se encuentra la tubería) y la parte posterior de la vivienda; en estos casos (especialmente en la parte baja de las quebradas El Pilar y La Pichosa) las aguas servidas son vertidas directamente a los cauces; de hecho, el caudal que circula por la quebrada El Pilar, cuando no ha llovido, es de aguas negras, generando un problema asociado de contaminación ambiental.

A pesar de los procesos que se presentan en la zona y que eventualmente pueden ocasionar una emergencia o un desastre, el 60% de los pobladores declaró no sentirse en peligro; el 22% dice sentirse en riesgo medio y sólo el 4% se siente realmente en peligro.

Aún así, en la mayoría de los casos los pobladores reconocen que en alguna medida ellos son responsables del peligro presente en la zona; por ejemplo, en el

riesgo por inundaciones admiten que el manejo adecuado de basuras y la limpieza periódica del cauce pueden contribuir en buena medida a su mitigación o control.

El 80% de la población encuestada dijo no conocer el CLE, sus funciones y lugar de atención, y por lo tanto no confían ni creen en algo que sencillamente no conocen.

Los habitantes que dijeron haber recibido algún tipo de capacitación en prevención de desastres o atención de emergencias (15%) fueron estudiantes de colegio. Al respecto, al 80% de la población le gustaría recibir capacitación en estos temas, especialmente si ésta es gratuita y es adelantada cerca de sus viviendas.

En cuanto a las viviendas afectables por procesos de remoción en masa y caída de rocas durante el proceso de adecuación del terreno, la mayoría de éstas han sido construidas en mampostería simple y con bajas especificaciones o calidad de construcción, condición que puede comprometer seriamente la estabilidad estructural de éstas durante el proceso de adecuación del terreno debido a la vibración producida por la maquinaria pesada, o al movimiento de tierras.

La concentración escolar Pantaleón Gaitán Pérez no se considera "vulnerable" ante los procesos considerados (inundación, avalancha y adecuación del terreno), pero eventualmente puede ser un sitio neurálgico ante la ocurrencia de otros eventos tales como sismo, incendios forestales, vientos fuertes o accidentes de tránsito, no solo por sus condiciones estructurales actuales sino también por la cantidad de personas que se encuentran concentradas diariamente en el lugar (cerca de 200 personas tanto en la jornada de la mañana como de la tarde, de las cuales el 95% son niños), pero igualmente puede ser un centro importante para capacitar a la población del lugar, través de los niños, en los temas de prevención de desastres, recuperación ambiental o atención de emergencias.

Durante la encuesta pudo percibirse dentro de la comunidad un rechazo inicial a colaborar con el proceso, debido a que en innumerables ocasiones (desde hace 10 años) diferentes entidades del Distrito han llegado a "recoger información similar sin que hasta el momento esta información haya generado acciones correctivas en los aspectos evaluados".

Igualmente, el amojonamiento que recientemente realizó la EAAB para demarcar las zonas de protección de las quebradas ha generado cierta inquietud entre los habitantes del sector, pues tienen versiones encontradas sobre la expropiación o compra de la parte de los predios que ha quedado incluida dentro de las mismas.

El predio en que se proyecta construir la urbanización San Jerónimo de Yuste tiene un escenario actual de riesgo nulo pues, como ya se ha mencionado, no existen elementos expuestos (habitantes, viviendas o infraestructura) ante los

procesos de remoción en masa que se suceden en las laderas del mismo (amenaza), y por lo tanto no puede haber riesgo como tal cuando no se encuentran presentes sus dos componentes.

Para la mitigación de riesgos a que pueda estar sometida la urbanización San Jerónimo de Yuste se tiene previsto reconformar el terreno de la cantera, de manera que los taludes queden en unas condiciones seguras ante procesos de inestabilidad; para ello se adoptó un talud general de 1.5H:1V, igual al mínimo valor de buzamiento de los estratos, cuando se realicen los cortes con dirección dentro 22° por encima o por debajo de la orientación de los estratos; de esta manera se elimina la posibilidad cinemática de falla plana, siguiendo los planos de estratificación.

Sin embargo, aunque no haya posibilidad cinemática de falla plana, cuando los estratos rígidos queden en la superficie del talud y su espesor sea inferior a 0.3 m, existe la posibilidad de falla por pandeo, por lo cual dentro de la conformación se adoptó por retirar estos materiales y evitar la situación.

Para un escenario de riesgo futuro, es decir una vez construida la urbanización, se considera que el riesgo es bastante bajo pues durante el proceso de adecuación y reconformación del terreno se eliminaron, manejaron o controlaron los procesos de remoción en masa existentes de tal forma que no representaran una amenaza para las nuevas edificaciones; aquellos casos en que el proceso no pudo eliminarse o controlarse en su totalidad, tal como sucede con el proceso de desprendimiento de bloques por la acción de sismos de magnitud considerable en la parte alta de la cuchilla del Yuste, fueron diseñadas medidas de mitigación (como barreras y muros) para disminuir la probabilidad de ocurrencia de la amenaza hasta niveles aceptables en el concepto de los especialistas. Igualmente debe considerarse que las edificaciones fueron diseñadas bajo todos los parámetros de refuerzo estructural exigidos por las normas vigentes (tal como la NSR-98), lo cual contribuye también a configurar un nivel de riesgo aceptable para los futuros pobladores, tal como se indicó en el numeral anterior.

2.2.13 Estudio Sobre Prevención de Desastres en el Área Metropolitana de Bogotá en la República de Colombia

Autor: Agencia Japonesa de Cooperación Internacional

Año: 2001

El gobierno de Japón, por requerimiento del Gobierno de Colombia, decidió a través de JICA (Agencia Japonesa de Cooperación internacional), realizar el

estudio sobre prevención de desastres para la ciudad de Bogotá (Colombia). Dentro de los objetivos del estudio está formular un plan de prevención de desastres y transferir tecnología a Colombia a través del personal capacitado.

A mediados del mes de abril comienza la primera fase del estudio, que consistió en la recolección de información primaria y verificación, mapas digitalizados y evaluación de desastres. Esta información incluye el POT, Estudio de Micro zonificación, bases de datos existentes.

La fase dos del estudio trabajó sobre la creación del mapa maestro de prevención de desastres, estimación de costos, evaluación de aspectos (sociales, económicos, ambientales y tecnológicos) e informe final

El estudio está contemplado para escenario de sismo, deslizamientos, flujos e instalaciones industriales.

La primera parte del informe, trata aspectos concernientes a la situación actual de la ciudad de Bogotá, entre ellos: condiciones naturales, económicas-sociales, desarrollo urbano, planes existentes, leyes y regulaciones sobre manejo de desastres, características de riesgos naturales, distribución de población, construcciones e infraestructura, servicios de salud, sistemas de comunicación, educación.

La población de Bogotá para el año 1993 era de 5'440.401 habitantes (14% del total colombiano), según datos del DANE. Presentando un incremento progresivo a partir de 1951, con una rata anual de 2% a 3%.

El Producto Interno Bruto de Bogotá para el año 1995 era de 16.6 billones de pesos, siendo aproximadamente el 25% de total nacional. El incremento del PIB para 1995 era de 6,84%. El sector que más contribuye al PIB de Bogotá es el sector terciario con 76%.

En cuanto al uso del suelo, Bogotá está regida por el decreto 388 de 1997, el cual define 3 categorías de uso: urbano, rural y expansión urbana. Existen planes de reasentamiento de viviendas, reubicación de industrias y monitoreo para el buen uso del suelo. Se tienen planeadas modificar y reforzar estructuras urbanas, que comprenden vías, centros urbanos, corredores urbanos y áreas urbanizadas.

Dentro de los planes existentes, se encuentra el Plan Nacional de Desarrollo (PND), en concordancia con el artículo 340 de la constitución y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) para Bogotá, aprobado por el decreto 619 del 2000, éstos planes están encaminados hacia la prevención de desastres y el ordenamiento territorial, respectivamente.

En cuanto a la regulación y leyes para manejo de desastres, los artículos 286, 296, 356, 357, 358, 359, 360, 361 y 322 de la Constitución Política de Colombia reglamentan su andar administrativo. La legislación sobre desastres comprende:

- Ley 46/1988: establece un Sistema Nacional Para Prevención y Atención de Emergencias
- Decreto 919/1989: regula el Sistema Nacional de Desastres
- Art 3 dec 919/1989: se crea la oficina de atención de desastres
- Decreto 652/1990: se crea la Dirección para la prevención y Atención de Emergencias (DPAE)
- Decreto 3019/98: sectores que participan en el manejo de desastres

Mediante el decreto 723 de 1999, se regula el Sistema Distrital de Desastres para Bogotá D.C. El cual está compuesto por el Comité Distrital para Prevención y Atención de Emergencias, Comité Interinstitucional Operativo, Técnico y Educativo y el Comité Local de Emergencias (CLE), bajo la coordinación de la DPAE.

El FOPAE, es el ente encargado de los fondos para desastres en Bogotá. Estos fondos, equivalen al 0.5% de los impuestos recaudados por el distrito.

Los riesgos naturales que afectan la zona de estudio se catalogan como: terremotos, movimientos de tierra, inundaciones e instalaciones industriales.

En lo que respecta a sismología, Bogotá ha experimentado tres sismos de intensidad VII (MKS) y cuatro de intensidad VIII, desde 1566 según lo reporta INGEOMINAS. En lo que respecta a mitigación Bogotá realizó en 1996 el primer estudio de microzonificación sísmica.

Los movimientos de tierra, se concentran en la parte este de la ciudad y son generados por la intervención del hombre, al cimentar sus viviendas en taludes naturales y artificiales. El estudio muestra que históricamente el mayor número de muertos por desastres naturales en Cundinamarca (80%), es producto de movimientos de tierra. En Bogotá se tiene para el periodo 1996-2001, que en la localidad de San Cristóbal se registra el mayor número de movimientos en masa de Bogotá, así el 22% (64) del total son deslizamientos y 20% (51%) del total son flujos de tierra.

Para mitigar los efectos de los movimientos de tierra en Bogotá se reasientan familias, pero no se instalan ni operan sistemas de monitoreo de movimientos en masa por personas cercas al área afectada. En Bogotá están instaladas 4 estaciones de monitoreo.

La distribución de la población edificaciones e infraestructura en Bogotá, están organizadas en 117 zonas llamadas UPZs (Unidad de Planeamiento Zonal). Estas UPZs agrupan a 6'378949 de habitantes (proyección DAPD).

El número de construcciones en el área de estudio, equivale a 1'990.000 unidades (incluidos ocho municipios cercanos), de los cuales 1.3 millones corresponden a residencias. Bogotá cuenta con 100 hospitales, 16 estaciones de bomberos, 28 estaciones de policía y 3562 parques.

El estudio incluye infraestructura (vías, puentes, aeropuertos, vías férreas) y líneas vitales (suministro de agua, alcantarillado, gas, energía, telecomunicaciones).

En lo que respecta a las comunicaciones existentes y sistemas de información, la entidad encargada es la DPAE y 16 entidades adscritas a la Red Distrital de Emergencias. Otra entidad responsable de las comunicaciones en la Defensa Civil

Dentro del análisis de vulnerabilidad de Bogotá y los ocho municipios cercanos, se consideran sismo, movimiento de suelo, inundaciones y tecnológico.

Para la parte sísmica, se utiliza el estudio general de amenaza sísmica (1996), el cual categorizó a Colombia en nueve zonas, de acuerdo con el espectro máximo de aceleración (Aa), Bogotá está en el nivel medio de zona de riesgo.

Los movimientos de tierra, se valoraron mediante registros de campo, interpretación de fotografías aéreas y basándose en el índice de riesgos, las áreas fueron clasificadas en tres grados, dependiendo de la magnitud de daño y de la necesidad de evacuación.

Para inundaciones, se cuenta con el estudio de la EAAB acerca de las obras de mitigación para inundaciones del río Bogotá, del cual se extractan las intensidades de lluvia para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años. La DPAE en el 2000, realizó los mapas de riesgo por inundaciones. Con estos mapas y la topografía se pueden identificar áreas de riesgo por inundaciones.

El análisis de vulnerabilidad contempla la vulnerabilidad física, la económico-social y la ambiental.

Dentro de la vulnerabilidad física, se tiene regulaciones para edificaciones resistentes a sismos (ley 11/1983, decreto 1400/1984, acuerdo 20/1995, ley 400/1997, decreto 33/1998, decreto 34/1999, decreto 2809/2000 y decreto 74/2001), el estudio de microzonificación sísmica.

Las entidades encargadas de las líneas vitales, tienen diseñados planes de contingencia, que en general están dispuestas en tres niveles, dependiendo de la importancia del evento y de la afectación esperada sobre las estructuras.

Sin embargo JICA hace su estimación de daños con base en la experiencia de sismos ocurridos en Japón y plantea funciones de daño para cada línea vital, así:

Tuberías de suministros y uniones

$$R_m = C_p \times C_d \times C_g \times C_i \times R(.) \quad (\#daños /Km)$$

Donde: $R(.)$ radio de estándar de daño = $2.88 \times 10^{-6} \times (\alpha - 100) \times 1.97$

C_p = factor de corrección por material de tubería (0.3-1.2)

C_d = factor de corrección por diámetro de tubería (0.5-1.6)

C_g = factor de corrección por topografía y suelo (0.4-3.2)

C_i = factor de corrección por licuefacción (1.0 -2.4)

α = aceleración máxima del suelo (gal ó cm/sec^2)

Tuberías de gas

$$R_m = C_p \times C_d \times C_g \times C_i \times R(.)$$

Donde: $C_p \times C_d = 0.1$; tuberías de acero (250 psi)

$C_p \times C_d = 0.1$; tuberías de polietileno

Cables eléctricos

Características de los daños del sismo de Kobe en Japón (cables aéreos):

Postes sin daño en áreas de intensidad $MMI \leq 8$ (380 gal)

0.55% de los postes rotos o colapsados $MMI \geq 9$ (mas de 380 gal)

0.275% pueden ser dañados, asumiendo que si un poste se rompe se lleva consigo un poste del lado, en áreas con $MMI \geq 9$

Características de los daños del sismo de Kobe en Japón (cables subterráneos):

No daño en áreas con $MMI < 8$

0.3% dañados en áreas con $MMI \geq 9$

La vulnerabilidad social, se establece de acuerdo al estrato socio económico de la zona, además se tiene en cuenta que la parte sur de la ciudad es en donde se encuentra la mayor concentración de población (400 hab/ha). Por otra parte dentro

de la vulnerabilidad económica se consideran pérdidas directas, indirectas (producción, empleo, servicios vitales e ingreso) y las pérdidas secundarias (epidemias, inflación, disparidad de ingresos, áreas periféricas aisladas).

2.2.14 Proyecto convenio de cooperación para el cuidado y defensa de la cuenca alta del Río Fucha, mediante el fortalecimiento de la participación social en conservación en la localidad de San Cristóbal, Bogotá.D.C, realizado entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la organización no gubernamental ENDA A.L.

Los documentos revisados de este proyecto, como referencia importante para el análisis de vulnerabilidad, fueron un documento de sistematización que relaciona la metodología empleada y los resultados obtenidos, el diagnóstico con base en información secundaria y primaria, un documento de conflictos ambientales en el que se incluye información social, ambiental, económica y política de la población relacionada con la cuenca alta del río San Cristóbal y un análisis de los resultados del proceso de capacitación que se desarrolló.

Este trabajo incluyó igualmente un proceso de sensibilización mediante talleres y caminatas ecológicas a la reserva forestal, frente a lo cual se revisó la lista de participantes para identificar los barrios que habían hecho parte del proceso.

El insumo principal para la elaboración del diagnóstico, fue la revisión de fuentes secundarias de información técnica, normativa y social de la cuenca alta del río San Cristóbal.

En primer lugar elaboran una definición de “cuenca” teniendo en cuenta aspectos biofísicos y socioeconómicos. Así, la cuenca se define como un área geográfica en la cual convergen factores bióticos, abióticos y sociales y está “conformada por el conjunto de aguas superficiales y subterráneas que se vierten formando uno o varios cauces, que generalmente desembocan en una red hídrica formada por varias quebradas y ríos o corriente de mayor caudal”¹. Posteriormente se hace referencia a la hidrología de una cuenca relacionando las órdenes de corrientes y las características físicas de una cuenca.

Más adelante, se hace una identificación y caracterización del área de estudio: la cuenca alta del río Fucha, la cual está conformada por las quebradas que se

¹ Documento Diagnóstico Proyecto ENDA - EAAB

relacionan a continuación: La Osa, Fotoga, Jacintillo, La Laguna, Aguas Claras, El Chuscal, El Pilar, Ramajal, Mina Vitelma.

El río nace a una altura aproximada de 3500 msnm, inicia su recorrido en dirección norte y tiene como afluentes principales las quebradas, La Mirla, Fotoga, Upatá, La Plazuela, La Colorada, El Charral, El Soche, y el río Palo Blanco. Recorre de oriente a occidente 21.4 Km. de la ciudad de Bogotá.

Su cuenca está dividida en tres zonas: oriental, que se caracteriza por el acueducto combinado y el desarrollo urbanístico completo (aunque en proceso de renovación); “sistema separado”, que comprende la zona de la carrera 30 hasta el río Bogotá (a excepción de la zona del Tintal); occidental que se encuentra aún sin desarrollo urbanístico.

En el marco jurídico – normativo, se hace referencia al contexto mundial del agua y la importancia del recurso hídrico, para posteriormente analizar la política medioambiental y del agua en Colombia. Finalmente se hace referencia al Plan de Ordenamiento Territorial y los cuatro componentes del mismo que tienen relación con su proyecto, que se refieren al Plan de Ordenamiento y Manejo los Cerros Orientales (POMCO) al que no se le dio viabilidad normativa, el Plan de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas (POMCA), el SIGAL, programa institucional por desarrollar del DAMA y el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado, cuyo objetivo es mejorar el alcantarillado y tratar las aguas residuales.

Más adelante se hace una contextualización histórica del Río Fucha, señalando la importancia que tuvo éste en cada una de las etapas de la vida humana. Así, antes de la conquista española, los indígenas valoraban las fortalezas de la cuenca alta del río por las buenas condiciones para la agricultura y se disputaban su dominio. Posteriormente, durante la época colonial, San Cristóbal se convirtió en espacio para el crecimiento urbano de Bogotá y dada la existencia de la fuente hídrica, el crecimiento se dio rápidamente. Se establecieron entonces grandes haciendas durante el siglo XIX, de familias muy pudientes económicamente que con el tiempo comenzaron a vender sus tierras en pequeños lotes, trayendo como consecuencia el acelerado proceso de desarrollo urbano desde comienzos del siglo XX en el sur oriente de Bogotá.

El estudio de la cuenca alta del Río Fucha, establece la zona de intervención en tres sectores. El primero de ellos está dentro de la zona de reserva, el segundo va desde la reserva hasta el barrio Velódromo en la carrera sexta y el tercero va desde allí hasta el barrio Sosiego en la carrera décima. De esta manera, describe los límites urbanísticos, los barrios que rodean al río, la geología, los suelos, el clima y la flora.

Respecto a las características sociales, el documento hace referencia inicialmente a datos de la localidad y posteriormente se refiere a la configuración de los barrios en parte baja, media o alta que es inversa a su estrato socioeconómico de acuerdo con la información suministrada en el diagnóstico, es decir, la parte baja es estrato 3, la media 2 y la alta 1.

La caracterización del estado de las aguas del Río Fucha, muestra que desde su nacimiento hasta que finaliza el área de reserva el río se encuentra en condiciones naturales y conserva aún parte de su fauna y flora. Sin embargo, al entrar a la zona urbana presenta factores de afectación negativa, relacionados con el vertimiento de aguas residuales, la inadecuada disposición de los residuos sólidos y el impacto ambiental que generó la construcción de la Urbanización de Compensar San Jerónimo del Yuste.

Por otra parte se realizó un estudio físico – químico de las aguas del río, analizando los resultados con la normatividad vigente respecto al uso del agua y de residuos líquidos para tiempo seco y tiempo de lluvia.

Desde el contexto social, el proyecto hace referencia a los factores que determinan la relación de la comunidad con el río, atendiendo a los diarios de campo y los resultados de charlas y entrevistas realizadas a la comunidad.

Las tres partes de la cuenca alta tienen una división marcada, caracterizada por la acusación de la parte baja y media respecto a la contaminación que hacen los barrios de la parte alta por su condición de ilegalidad. De esta manera se dificulta el trabajo conjunto para emprender acciones de recuperación debido al conflicto social existente.

El papel del Ejército en este espacio ha marcado las relaciones de los pobladores con el río, ya que se ha convertido en el límite entre la comunidad y la fuerza del poder estatal. Así mismo la normatividad de uso de la ronda del río ha hecho que la comunidad cambie su relación con éste. Generacionalmente los abuelos recuerdan la belleza del río y por lo tanto le otorgan mayor importancia, mientras que los niños y jóvenes ni siquiera se percatan de su presencia. Los adultos consideran el río como foco de inseguridad por la presencia de habitantes de calle, e insalubridad por la presencia de roedores y moscas.

Respecto a la organización comunitaria se señala la potencialidad de los barrios existentes y las instituciones barriales y locales que hacen presencia en los barrios, así como la conformación de grupos de trabajo ambiental como CORVIF y la mesa temática ambiental, entre otras.

Se señala la problemática ambiental y social, relacionada con la existencia de barrios en el área de reserva del distrito, identificando algunos datos en hectáreas

y número de habitantes de cada zona. Esta situación caracteriza la cuenca como una zona en alto riesgo.

Las propuestas del proyecto se fundamentan en la importancia del cuidado de la cuenca alta desde el contexto técnico – ambiental y político – normativo y argumentan la necesidad de involucrar a la comunidad en la recuperación ambiental, generando procesos de apropiación territorial y sentido de pertenencia a través de la recuperación de la memoria histórica.

2.2.15 Historia urbana de Bogotá

Desde el año 1910 hasta el año 2000, la ciudad de Bogotá sufre procesos de desarrollo urbano fuertes, con profundas afectaciones en el medio ambiente.

De 1980 a 1910, la ciudad de Bogotá presentó un modelo lineal de expansión, se crea los barrios San Diego, Chapinero y San Cristóbal, siguiendo los cursos de agua presente.

Para el periodo comprendido entre 1910 y 1936 la ciudad experimenta profundos cambios sociales, debidos a tres condiciones particulares; normalidad política por el fin de la guerra de los 1000 días, expansión del comercio internacional y creación de nuevos sectores productivos. Esto produjo un crecimiento acelerado de la población para los años 30's, con tasas de natalidad del 20% y de mortalidad de 2%, generando gran déficit de vivienda. En general, el crecimiento demográfico de la ciudad genera la necesidad de producción de bienes y servicios, lo que lleva a la explotación de materiales de cantera para la construcción y establecimiento de industrias en el casco urbano de la ciudad. Para la época, los mandatarios locales consideraban prioritario el funcionalismo arquitectónico, en lugar de la calidad ambiental, se contrata a Kart Brunner para la elaboración del plan vial y el trazado y regulación urbanístico.

En el periodo siguiente de 1936 a 1957, cambios políticos fuertes como el segundo periodo de Lopez Pumarejo y la muerte de Jorge Eliécer Gaitán. Crisis del capitalismo mundial, exportamos café y oro e importamos manufacturas, la ley de reforma agraria de 1936 no tiene efectos y la gente emigra hacia las grandes ciudades. Se crean las economías nacionales producto de la segunda guerra y la crisis económica fomenta la concentración de capital. La población cambia de 330000 hab en 1938 a 378200 hab en 1942. La mayor concentración de población de la capital se observa en la localidad de San Cristóbal con 610000 hab en 609 hectáreas.

Nuevas vías construidas generan expansión urbana hacia el sur y al occidente. Las antiguas haciendas; La conejera, Hato Grande, Salitre, Tequendama, entre otras, promueven el urbanismo al lotear sus predios. El aumento de la clase obrera debido al establecimiento de grandes empresas, conlleva a la creación de asentamiento desordenado alrededor de las fábricas.

Hasta el año 1954, Bogotá depende de la administración del departamento de Cundinamarca. Cambios en el uso del suelo e invasión de las rondas de los ríos Fucha y Tunjuelo. Se eleva la ciudad a categoría de Distrito Capital y se anexan los municipios de Bosa, Usme, Negativa, Usaquén y Fontibón, en 1973 están en funcionamiento 13 alcaldías locales y la capital se convierte en el mayor foco de productividad del país, con 63% del total nacional.

En 1971, 50% de los habitantes de la capital son inmigrantes, creándose un déficit de infraestructura cercano al 2.5 veces el recaudo predial. Se empiezan a crear las entidades distritales (IDU, SDS, IDCT), y aunque las administraciones de los alcaldes fueron satisfactorias, se empieza a evidenciar el problema de la no continuidad de las administraciones.

La zonificación y el perímetro urbano, empiezan a ser temas relevantes para la ciudad, se establecen los primeros planes de ordenamiento territorial (POT), y se establece el acuerdo 7 de 1979 para la definición de zonificación.

Para la época comprendida entre 1980 y 2000, empieza el interés de los gobernantes por construir ciudad. Para los años 80's, se siente la recesión mundial. En 1984 se lleva a cabo un plan de ajuste para solicitar nuevos créditos (impuestos, fomento a exportaciones, disminución de importaciones, disminución del gasto público, descenso de subsidios, tarifas de servicios públicos) y aunque funciona, situaciones como falta de empleo, terrorismo y otros influyen en el desarrollo económico. En el año 1994, el endeudamiento de las entidades públicas era cercano a 447 mil millones de pesos.

Se presenta en la ciudad un fenómeno de implosión urbana, se crea vivienda multifamiliar y se compacta y densifica lo ya construido. Se crean sectores expulsivos y otros receptores, además los altos costos de la vivienda promueven nuevos desarrollos ilegales en Suba, Usme, Bosa y Ciudad Bolívar.

Las cifras de asentamientos ilegales para el periodo entre 1973 y 1985, muestran que 33% de las viviendas nuevas son ilegales, con más fuerza en Ciudad Bolívar, Kennedy y Bosa. Se trasladan zonas industriales de la calle 13, hacia la calle 80ª, Tocancipá, Funza, Briceño y se crean los San Andresitos.

Acueducto:

El primer acueducto de Bogotá fue construido en 1886, en tubería de hierro, no contaba con la cobertura necesaria y su construcción fue complicada. El agua se requería para dos actividades principales, para el consumo humano y para el movimiento de molinos de trigo. Para le época el mal uso del recurso produjo epidemias entre la población.

El desarrollo de Bogotá fue acelerado, así para 1910 la ciudad contaba con 103000 habitantes, 1398 animales, 12 cervecerías (11000 lts/día), 175 chicherías (40000 lts/día), 200 baños públicos y 100000 m² de parques. Para ese año el gasto total de agua de la ciudad era de 7800720 lts/día y las fuentes disponibles de agua eran el río San Francisco, Arzobispo (acueducto de San Diego), río San Agustín, quebrada La vieja y Las Delicias, el río San Cristóbal y el río Tunjuelo.

Para 1912, había 116951 habitantes en un área de 909 ha, en 1934 había 330000 habitantes en 2514 ha. En 1923 se construye la planta Vitelma, para aprovechar las aguas del río San Cristóbal y en 1928 se lleva a cabo la segunda etapa de Vitelma para aprovechar también las aguas del río Tunjuelo.

De 1914 a 1919 se instalaron 3000 nuevos servicios de agua potable.

En 1920, se empieza a clorar el agua de consumo humano, pese a la renuencia de la gente.

En 1924 la ciudad contrata los servicios de la Casa Ullen & Co, para el desarrollo del diseño de decantadores para purificar el río San Cristóbal, para la fecha y ase contaba con el tanque de almacenamiento de Vitelma.

En 1927 se crea la Comisión de aguas.

Para el periodo de 1929 a 1932, disminuye la lluvia promedio en la ciudad. Llegan en 1931 técnicos de Hazen and Evertt, para el diseño de La Regadera, se contratan estudios para embalsar las aguas de los ríos Teusacá y Tunjuelo en 1933. En 1935, empieza La Regadera a conducir agua por gravedad.

En 1949 el servicio de acueducto sigue siendo deficiente, se crea el acuerdo 10/1949, formulando las nuevas directrices para doblar la cobertura, pero con aumento de tarifas.

En 1958 se construye la planta de Tibitóc.

1968, racionamiento de agua. Vitelma, San Diego, Tibitóc suman 45 m³/s y Tibitóc II produce 12.5 m³/s.

De 1966 a 1985 se desarrolla el proyecto Chingaza, desviando ríos de la zona de los llanos orientales.

En 1991, se inician las obras del embalse de San Rafael.

Alcantarillado:

En 1884 se recomienda la canalización del río San Francisco y en 1906 se recomienda canalizar los demás ríos. En 1925 luego de varias paras se entrega el río San Francisco canalizado.

En sus orígenes, Bogotá no contaba con un sistema de alcantarillado diseñado para tal fin, los desechos eran arrojados a los cauces de las quebradas cercanas y en las calles, debido al hacinamiento, a la falta de unidades de baño en las viviendas y al lavado en de basuras en la calle . Esto produce epidemias, como la de gripa española en 1918.

En 1884 se construyen las primeras alcantarillas, por parte de obreros locales, sin especificaciones técnicas. En 1912, se recomienda utilizar el alcantarillado existente para ampliar la red.

En 1922, se amplía la red de alcantarillado con base en diseños técnicamente viable y en 1923 Bogotá cuenta con 66 cuadras con servicio de alcantarillado. Se remodelan los escusados públicos, se construyen en el barrio Buenos Aires 28 habitaciones, con servicio sanitario e instalación de agua y alcantarillado para aguas sucias.

Para el periodo 1925 – 1927, se crea la junta de pavimentación. Esta entidad realiza un estudio, el cual afirma que la ciudad cuenta con una cobertura de más o menos 50% de red de alcantarillado. Se propuso el montaje de una planta de purificación para las aguas del río Bogotá. Se realizan obras de alcantarillado inadecuadas debido a la mala calidad de los materiales. Se llevan acabo obras de saneamiento en las faldas de Monserrate y Guadalupe.

Se presentan problemas de salud por falta de alcantarillado, conduciendo a la canalización del río San Francisco.

Una problemática constante, es el desarrollo de nuevos barrios sin servicios de saneamiento básico.

En 1933 falla la canalización del río San Francisco, para remediar la situación se construye un aliviadero lateral. En ese mismo año se implementa un sistema de

estadísticas sanitarias y se prohíbe el uso de las aguas de la quebrada La Vieja para el consumo humano.

1948, se crea la oficina del plan regulador de Bogotá, se replantea la inquietud acerca del río Bogotá.

Y en 1950 se evidencian problemas de deficiencia en el servicio por falta de inversión, Bogotá se convierte en la segunda ciudad de Latinoamérica por muertes debidas a la tifoidea. En 1951 se contratan expertos para el diseño del alcantarillado.

1954, Bogotá se convierte en distrito especial y se adhieren 6 municipios aledaños.

1955 se crea la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), por primera vez se lleva a cabo el levantamiento topográfico del río Bogotá y se empiezan a monitorear fluctuaciones y caudales.

En 1962 se formula el plan maestro de alcantarillado, con base en estimaciones de 3.2 millones de habitantes para 1985. En 1967 empieza la segunda etapa, se canaliza el río San Cristóbal y sus interceptores. Se plantea clarar las aguas servidas y enviarlas al río Bogotá por medio de un canal continuo a este, pero se decide utilizar lagunas de estabilización. Para la época se recolectan aguas servidas de 18000 ha, se establecen las estaciones de bombeo El Salitre y Fontibón.

1991 comienza el proyecto Santa Fe I, para la intervención del río Bogotá (150 lts/hab/día). Las cifras de contaminación para el río San Cristóbal cuantifican 17880 Kg; DBO/día y 124848 Kg; SST/día.

Se crea la Ley 99 de 1993 del Ministerio de Medio Ambiente. En 1994 se firma el contrato de descontaminación del río Bogotá, los judiciales promueven la liquidación del contrato.

Basuras:

Desde 1910 a 1936, la disposición de basuras se lleva a cabo en la hacienda Quiroga, sin embargo no se cuenta con el parque automotor necesario para la recolección.

Mediante el acuerdo 30 de 1958, se crea la EDIS

El volumen de basuras de la capital para 1966, era de 50000 ton/día, y para 1969 aumento a 216000 ton/día.

1980 se diseña y en 1994 entra en funcionamiento el relleno de Doña Juana, dejando fuera de operación los rellenos de El Cortijo y Gibraltar. En 1997, se genera un deslizamiento de basuras de 800000 ton.

En 1993 se liquida La EDIS y se subcontrata la recolección por tonelada, se presenta una crisis de acumulación de basuras en la vía pública.

Cuencas y reforestación:

1920, expertos promueven sembrar especies foráneas, aun así la zona no era apta por topografía, además no había los recursos para las semillas y para el alcance del proyecto. Fuerte invierno causa avenida torrencial en el río San Cristóbal. Se presenta un informe de la junta administradora del acueducto, afirmando que una marcada deforestación por la tala de bosque para vivienda y leña de cocina. Se entregan las cuencas hidrográficas al acueducto.

Para los años 30^a, los cerros fueron urbanizados, en zonas como Chapinero, Perseverancia y Usaquén.

Según Ricardo Lleras Codazzi, los cerros presentan condiciones geológicas que no permiten la reforestación, solo la conservación de los suelos.

Continúa la explotación de canteras para la producción de materiales de construcción, la empresa de acueducto compra terrenos de las cuencas hidrográficas.

En 1945, empieza la recuperación de los cerros de Bogotá y la reforestación de las márgenes de los ríos San Cristóbal, Arzobispo, San Francisco, quebrada La Vieja y quebrada Las Delicias. En 1947 Francisco Wiesner, propone un parque longitudinal no solo de árboles, se debe proteger la hierba y los arbustos. Las especies plantadas son exóticas aclimatadas.

Transporte urbano:

El tranvía es inaugurado en 1884 con tracción animal y el 20 de julio de 1910 se convierte a energía eléctrica.

De 1920 a 1930 se expande Bogotá hacia el norte, se consolida el barrio San Cristóbal.

En 1951, termina la vida del tranvía y se implementa transporte con buses a gasolina, con un impacto fuerte por emisiones de gases. Mediante el acuerdo 96 de 1948, se fijan las tarifas del servicio de transporte.

Plan vial en el acuerdo 38 de 1961 establece rutas y clasificación de de vías, normas y especificaciones. Se definen como medios de financiamiento la valorización. Desaparecen las empresas municipales y los operadores privados comienzan los monopolios, repercutiendo en las tarifas y prestación del servicio, por la llamada guerra del centavo. Se plantean soluciones de transporte masivo, sin embargo todas las iniciativas se caen por fuerza política de burgomaestres del gremio transportador.

Estudio de transporte y desarrollo urbano, plantea vías en zonas periféricas de la ciudad, produciendo asentamientos a lo largo de las vías, generando pérdidas de amortiguamiento ambiental y evacuación de aguas servidas a la planta el salitre.

CAPITULO 3

MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo presenta los conceptos, definiciones y marco de referencia general que se adoptó para el desarrollo de la investigación. Con el fin de que sirva como base referencial de posteriores trabajos, se hace una amplia revisión bibliográfica en particular con la definición de vulnerabilidad tanto social como física y riesgo.

3.1 Flujos de detritos e inundaciones

Los movimientos en masa se refieren en términos generales a todo desplazamiento ladera abajo de material geológico debido principalmente a la fuerza de la gravedad. Esto, por supuesto, involucra un conjunto de tipos de movimientos con diversas características que abarcan desde la simple caída de un bloque de roca hasta movimientos lentos o rápidos similares a los de un fluido. Sin embargo, no hay un consenso universal sobre la clasificación de los mismos y es así como en la literatura especializada se encuentran diversos términos para referirse a ellos. No obstante, se puede decir que uno de los sistemas más ampliamente aceptados por los especialistas en Ciencias de la Tierra es la clasificación propuesta por Varnes en 1978, posteriormente actualizada por Cruden & Varnes (1996). En ella, los movimientos se clasifican principalmente de acuerdo con el mecanismo del movimiento y los materiales involucrados. Entre estos mecanismos se cuentan los movimientos tipo flujo, llamando así aquellos que presentan una deformación interna significativa del material.

Sin apartarse del esquema general de Varnes, Hungr et al. (2001) discuten el caso de los flujos y con base en los atributos más importantes de este tipo de movimientos proponen una clasificación que se considera apropiada para los propósitos del proyecto y constituye el marco de referencia conceptual en lo que tiene que ver con la mecánica de los movimientos en masa tipo flujo.

La clasificación de Hungr et al. (2001) tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Mecanismo del movimiento
- Propiedades del material
- Velocidad del movimiento

- Otros atributos

Dando lugar a las siguientes definiciones, en orden alfabético:

Crecida de detritos (Debris flood), flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal o cauce. Este tipo de crecida puede transportar una cantidad de sedimentos semejante a la de un flujo de detritos, pero en este caso los sedimentos son arrastrados por la fuerza tractiva del agua y por lo tanto el caudal pico es comparable al de una crecida de agua multiplicada por un factor entre 1 y 2. De esta manera, la capacidad de daño de una crecida de detritos es similar a la de una inundación y los objetos impactados quedan enterrados o rodeados por los detritos pero frecuentemente sin sufrir daño. Sin embargo, pueden ocurrir eventos excepcionales por descargas de agua inusualmente altas, tales como las producidas por el rompimiento de presas (naturales o artificiales) y el deshielo de capas de hielo de volcanes.

Deslizamiento por fluidificación (flow slide), flujo muy rápido o extremadamente rápido de material con estructura ordenada o desordenada, en taludes de pendiente moderada que involucra un exceso de presión de poros o licuación del material en la zona donde se origina el movimiento en masa. De acuerdo con el tipo de material puede denominarse más específicamente como: deslizamiento por fluidificación de arena, deslizamiento por fluidificación de limo, deslizamiento por fluidificación de detritos o deslizamiento por fluidificación de roca débil.

Deslizamiento por fluidificación de arcilla (Clay flow slide), flujo muy rápido a extremadamente rápido de arcilla sensible licuada con un contenido de agua igual o muy cerca al de su estado original. Este movimiento se inicia a partir de fallas rotacionales múltiples retrogresivas. En ciertas arcillas la fluidificación se presenta por colapso de la estructura interna del suelo, como es el caso clásico en las llamadas quick clays o arcillas extrasensibles.

Flujo (Flow), movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido pero que en principio se origina a partir de otro movimiento como un deslizamiento o caída. Hungr et al. (2001) clasifican a estos movimientos de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles.

Flujo seco (Dry –sand, silt, gravel, debris- flow), movimiento tipo flujo de material granular con estructura ordenada o desordenada, suelto, seco o húmedo, durante el cual no hay un exceso de presión de poros significativa. De acuerdo con el tipo de material puede denominarse como flujo de arena seco, flujo de limo seco, flujo de gava seco o flujo de detritos seco.

Flujo canalizado Tipo de movimiento en masa en el cual el material desplazado transita en su mayor parte confinado a lo largo de un cauce o canal.

Flujo no canalizado Tipo de movimiento en masa en el cual el material desplazado transita a lo largo de una ladera sin confinamiento lateral.

Flujo de detritos (debris flow), flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados no plásticos que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado (Índice de plasticidad menor al 5% de arenas y fracciones más finas). Este tipo de evento se distingue también porque el agua del cauce se incorpora al cuerpo del flujo de detritos incrementando su contenido de agua, el confinamiento lateral que además de ayudar a mantener la profundidad del flujo facilita un cierto tipo de ordenamiento de las partículas sólidas y el desarrollo de oleaje. El ordenamiento se refiere a que los clastos más grandes tienden a quedar cerca de la superficie del flujo, lo que se conoce como gradación inversa. Por otra parte, el caudal pico que presentan estos flujos puede ser hasta 40 veces mayores que los que causan una inundación. Otra característica que distingue a estos flujos es la forma de la depositación del material sólido: cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos son expulsados hacia los lados para formar una especie de jarillones y el frente es sobrepasado por el material fino que viajaba tras ellos hasta detenerse tomando una forma lobulada gruesa.

Flujo de lodo (mud flow), flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad > 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al de flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por fluidificación de arcilla en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento mientras la fluidificación ocurre por licuación *in situ* sin un incremento significativo del contenido de agua.

Flujo de tierra (earth flow), movimiento intermitente, rápido o lento, de tierra arcillosa plástica (Hung et al., 2001). El mecanismo dominante en este caso es el deslizamiento a un nivel de resistencia igual a la residual.

Flujo de turba (peat flow), movimiento lento a muy rápido en forma de flujo de turba saturada y que involucra una alta presión de poros.

En las anteriores definiciones se hace la distinción de los diferentes materiales de acuerdo con la siguiente descripción:

Detrito(s) (debris), material suelto con estructura desordenada y de baja plasticidad, originado por procesos de movimientos en masa (coluviones),

meteorización (suelo residual), transporte glacial (tilita, morrenas), volcanismo explosivo (depósitos piroclásticos), o desechos antrópicos desordenados tales como estériles de minería. Los detritos también pueden contener una proporción significativa de material orgánico, incluyendo troncos y ramas de árboles o cualquier otra cubierta orgánica, (Hung et al, 2001). En la clasificación de Varnes (1978) y Cruden & Varnes (1996), se llama así a un material que contiene una proporción significativa de materiales gruesos en donde entre un 20% y un 80% de las partículas son mayores a 2 mm y el resto menor a 2 mm; en este caso el término se utiliza para el material involucrado en el movimiento pero antes del desplazamiento.

Lodo (mud), suelo arcilloso blando, remoldeado, cuya matriz (arena y finos) es significativamente plástica (Índice de Plasticidad > 5) y cuyo Índice de Liquidez es mayor a 0.5 cuando se encuentra en movimiento.

Tierra (earth), a) Suelo para ingeniería con el 80% o más de las partículas que lo componen de tamaño menor a 2 mm (Cruden & Varnes, 1996), b) Material producto de la meteorización de arcillas duras y de rocas arcillosas como lodolitas, shales y ciertas rocas metamórficas, con una consistencia más cerca del Límite Plástico (LP) que del Líquido (LL) y un Índice de Liquidez generalmente menor a 0.5 (Hung et al., 2001).

Lo anterior indica que en la modelación de los movimientos en masa tipo flujos (actuales o potenciales), es necesario primero clasificar el tipo de movimiento mediante la identificación de sus características bajo los cuales o similares criterios expuestos anteriormente.

Por su parte en la clasificación de Pierson y Costa (1987), tanto las inundaciones como los flujos están clasificadas en función de la concentración de sedimentos que lleva el flujo. En esta clasificación, el comportamiento del flujo depende de sus propiedades reológicas, es así como las inundaciones con poca concentración de sedimentos se comportan como un fluido Newtoniano, mientras que los flujos a medida que aumenta su concentración de sedimentos se comportan más como un material no Newtoniano.

La Figura 3-1 muestra las curvas de flujo para un líquido idealizado y para cuerpos reológicos plásticos; si hablamos de flujo, este podría ser definido como la deformación continua e irreversible de un material geológico que ocurre en respuesta a un esfuerzo aplicado; en la mayor parte de las situaciones la fuerza aplicada es la gravedad actuando usualmente como esfuerzo cortante y el material es alguna mezcla de partículas sólidas (rocas, suelo, detritos orgánicos), agua y aire.

La clasificación propuesta por Pierson y Costa (op.cit.) hace una distinción entre los diferentes tipos de flujo usando una matriz bidimensional basada en la velocidad media del flujo y la concentración de sedimentos (Figura 3-2); se basa en el entendimiento de que la respuesta reológica de una mezcla de agua – sedimentos para una tasa de deformación dada es gobernada principalmente por la concentración de sedimentos (o contenido de agua) y es afectada en menor proporción por la distribución de tamaños de los sólidos y las propiedades químicas de las partículas.

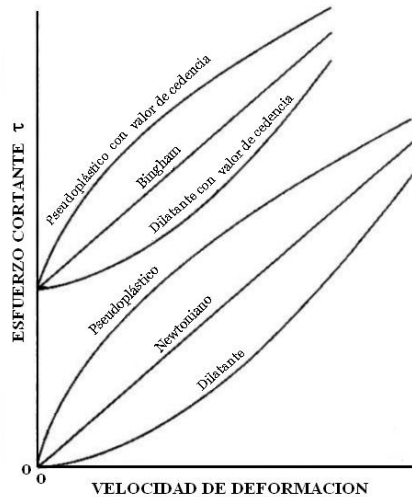


Figura 3-1. Curvas de flujo para un líquido idealizado y cuerpos reológicos plásticos, con los nombres de los modelos de flujo indicados. Los líquidos no exhiben resistencia al corte. Los cuerpos plásticos comienzan a deformarse solo después de que un esfuerzo de cedencia, τ_c , es alcanzado (Pierson y Costa, 1987).

Para un área geográfica dada, la distribución del tamaño de partículas y las propiedades químicas podrían tender a ser más constantes que la concentración de sedimentos, por esta razón la concentración de sedimentos es considerado un parámetro más sensible y se eligió como la segunda variable para la matriz de clasificación (Figura 3-2); en el eje horizontal no se muestran números para la concentración de sedimentos excepto para agua pura (0%) y sedimentos secos (100%) debido a que los valores exactos dependerán de la composición granulométrica y la composición físico – química de las partículas. Las fronteras en el diagrama de clasificación son sólo aproximadas y también tienen un alto grado de inferencia, debido a que las mediciones en campo son muy pocas, entre más registros sean llevados a cabo, las fronteras serán mejor definidas. En este sistema de clasificación según la apariencia del flujo en campo se puede dividir en dos grupos:

Flujo Aparentemente Líquido: Cuando se observa esta condición en campo, dos tipos de flujo con concentraciones relativamente pequeñas de sedimentos son distinguidos en el sistema de clasificación:

- **Flujo Canalizado (Streamflow):** Definido como el flujo normal de agua con una concentración de sólidos lo suficientemente pequeña para que su comportamiento no sea afectado por la presencia de sedimentos en transporte, es un fluido Newtoniano.
- **Flujo Hiperconcentrado (Hiperconcentrated Streamflow):** A medida que la concentración de partículas suspendidas aumenta, se alcanza un punto en el cual dichas partículas empiezan a interactuar, cuando la interacción de partículas ocurre el fluido adquiere una resistencia a la cedencia y empieza a comportarse como un fluido no – newtoniano. Aunque el flujo hiperconcentrado fue definido inicialmente por Culbertson en 1964 como un flujo corriente el cual posee concentraciones entre el 40% – 80% en peso (20% - 60% en volumen) Pierson y Costa en su sistema de clasificación lo definen como una mezcla de agua y sedimentos que fluye, la cual posee una resistencia a la cedencia medible, pero que aún aparenta fluir como un líquido.

Flujo de Fluidos Plásticos: en este sistema son incluidos dos tipos de flujos con comportamiento plástico:

- **Flujo de Lodos (Slurry Flow o Mudflow):** A medida que la concentración de sedimentos aumenta en la mezcla, la resistencia a la cadencia se incrementará lentamente hasta que un punto de transición es alcanzado (frontera B, Figura 3-2.); después de este umbral, la resistencia incrementará rápidamente; la transición que marca este umbral puede ser identificada por la línea continua de la Figura 3-3, allí se observa que el cambio en la tasa de incremento en la resistencia a la cedencia es más abrupto en mezclas gruesas que en mezclas finas, este incremento puede ser atribuido al principio de fricción interna, y a las fuerzas electroquímicas que aun pueden dominar en las mezclas ricas en arcilla.

En este aparte un flujo de lodos se define como una mezcla de agua – sedimentos que tiene la suficiente resistencia a la cedencia para exhibir un comportamiento de flujo plástico en el campo (esto es formar frentes lobulados y pendientes, diques laterales y llevar partículas tamaño grava o bloques en suspensión); como tal la mezcla está saturada, el agua en los poros es atrapada en algún grado por la estructura de los granos, y el

índice de liquidez (en mezclas de grano fino la relación de humedad natural con el límite líquido del sedimento) es mayor que 1.0.

Cuando el contenido de limo y arcilla de la mezcla es relativamente alto o si la tasa de corte, el diámetro medio de granos, la densidad de los granos y contenido de agua son relativamente bajos, las fuerzas viscosas pueden dominar el comportamiento del flujo. Bajo esas condiciones el modelo plástico Bingham es elegido frecuentemente como la ecuación constitutiva para predecir el comportamiento del flujo; cuando las fuerzas viscosas dominan al flujo se le conoce como flujo de lodos viscoso (*viscous slurry flow*).

Cuando la viscosidad del fluido en los poros es relativamente baja y las tasas de corte, diámetro medio de granos, densidad y contenido de agua son altas, el efecto dominante de las fuerzas viscosas es reemplazado por fuerzas inerciales donde el momentum es transferido a través de la colisión de partículas; el flujo en el cual éste mecanismo es dominante se conoce como flujo de lodos inercial (*inertial slurry flow*), en este caso el modelo del fluido dilatante puede ser usado para modelar el comportamiento.

- **Flujo Granular (Granular Flow):** El flujo granular comienza cuando la concentración de sedimentos del material se incrementa hasta el punto donde las presiones de agua de los poros no están más tiempo en exceso de presiones hidrostáticas (Frontera C, Figura 3-2), y el peso total de la masa granular que está fluyendo es soportada por el contacto grano a grano o por colisiones.

Un flujo granular se define cuando la concentración de sólidos es alta, la interacción directa entre granos individuales es frecuente y el comportamiento volumétrico es gobernado enormemente por las fuerzas entre partículas, llámense fricción o colisión.

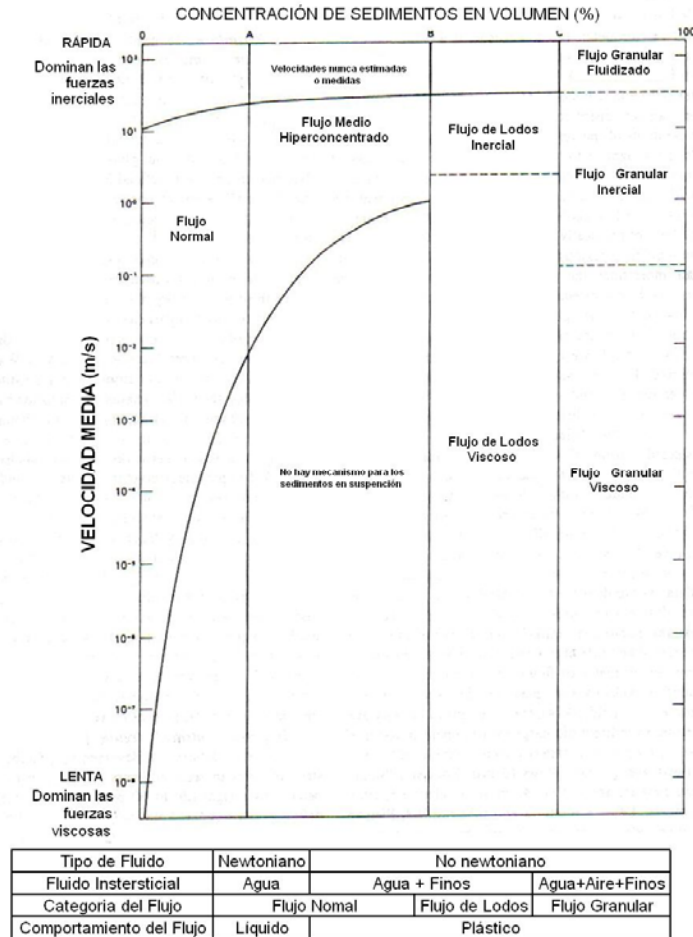


Figura 3-2. Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua. Las fronteras verticales A, B, y C son umbrales reológicos y son función de la distribución granulométrica y de la concentración de sedimentos (Pierson y Costa, 1987).

Cuando ocurre un flujo a bajas tasas de corte, el arreglo de partículas es fuerte, y los efectos inerciales de los granos son omitibles, se dice que el flujo es granular friccional (*frictional granular flow*); el flujo granular friccional abarca los regimenes de flujo macro –viscoso y cuasi – estático propuestos por Savage’s en 1984.

Cuando ocurre un flujo con moderadas tasas de corte, lo efectos de la inercia de los granos empiezan a dominar, pero si los efectos friccionales son aun significativos, se dice que el flujo es granular inercial (*inertial granular flow*) en este las colisiones entre los granos transfieren momentum

entre partículas resultando en un esfuerzo dispersivo el cual es medible. Las masas de detritos que exceden el millón de metros cúbicos presentan altas tasas de corte con velocidades que varían desde 50 hasta 100 m/s, bajo esas condiciones la transferencia de momentum por las colisiones entre partículas determina el comportamiento del flujo, algunos de esos movimientos tales como avalanchas de detritos o los *Sturztroms* viajan grandes distancias en proporción a avalanchas de detritos más pequeñas, tales movimientos se denominarían flujos granulares inerciales rápidos.

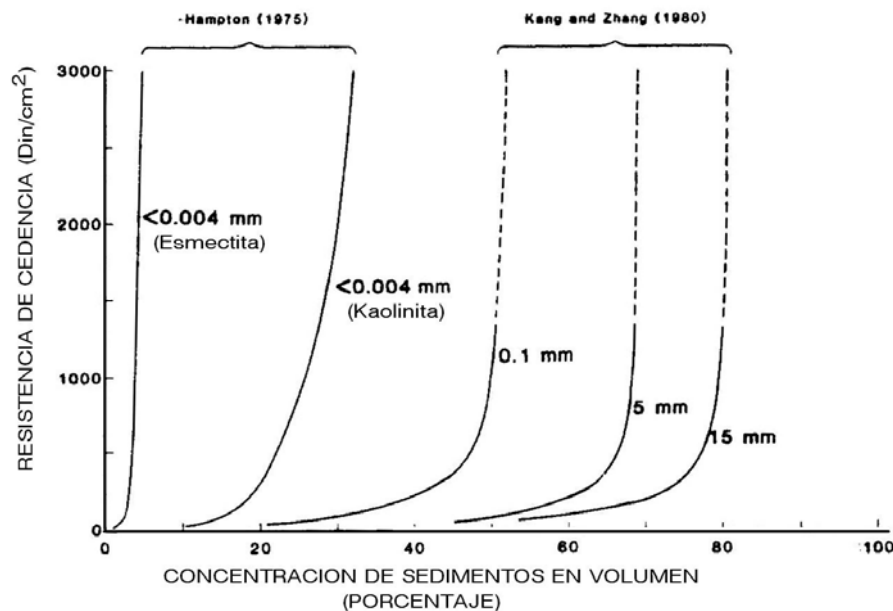


Figura 3-3. Resistencia a la cedencia de varias mezclas de sedimentos – agua (tamaño promedio de granos indicado) graficado contra concentración de sedimentos (Pierson y Scott, 1985), la intersección de cada curva con las abscisas marca la transición de flujo normal a flujo hiperconcentrado (frontera A de la Figura 3-2). El incremento abrupto de la pendiente en cada curva, marca aproximadamente la transición de flujo hiperconcentrado a flujo barroso (frontera B de la Figura 3-2)

Mientras las categorías en la Figura 3-2 son un enfoque para clasificar flujos sólo con base en el comportamiento reológico, éstas también pueden ser usadas para poner fronteras reológicamente basadas en términos de procesos geomorfológicos mejor conocidos; de esta manera se presenta la clasificación de la Figura 3-4; allí

el término “debris flow” o flujo de detritos, parece ser el más indicado para los flujos de lodos, tanto en el rango inercial como en el rango viscoso, excepto para los flujos extremadamente lentos de regolito saturado, conocidos como soliflucción. Aunque el flujo de lodos viscoso frecuentemente llamado flujo de lodo (mudflow) es muy rico en material fino, la clasificación se basa en la tasa de movimiento y no en su composición, por lo que se considera adecuado incluirlo en esta categoría

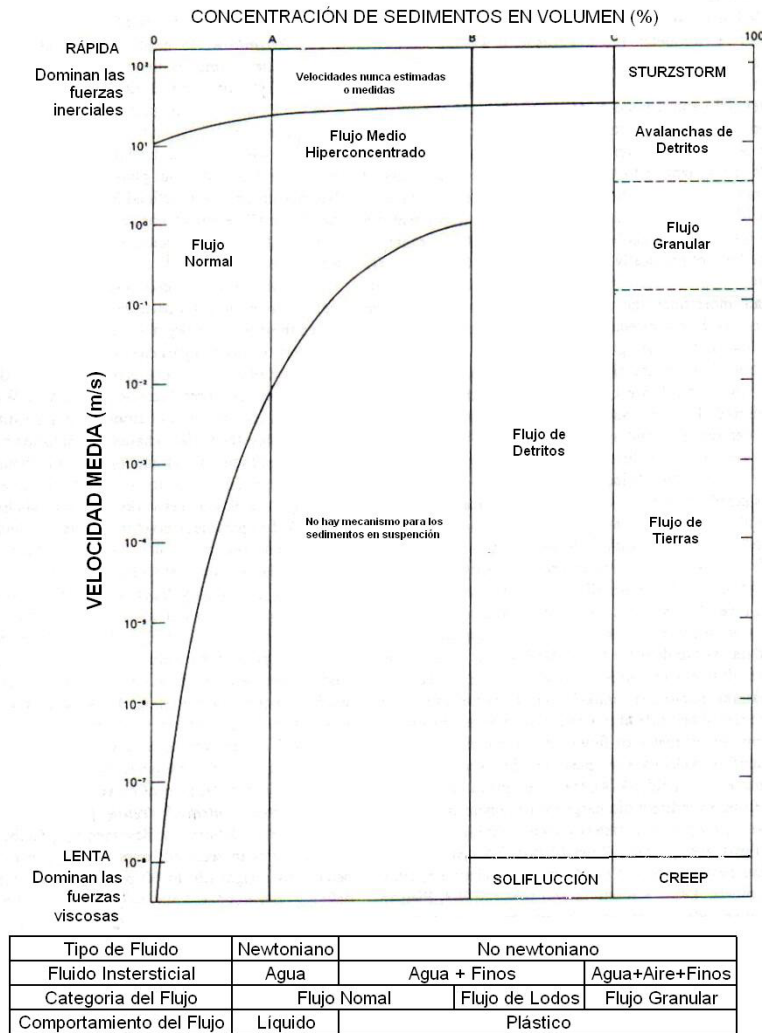


Figura 3-4. Nomenclatura apropiada para la clasificación reológica propuesta en la Fig.3 (Pierson y Costa, 1987)

Coussot y Meunier (1996) colocan a los flujos de detritos en un punto intermedio entre los deslizamientos y los flujos hiperconcentrados (carga de fondo intensa) debido a la transición de características bien definidas como celeridad, naturaleza y tipo de flujo; por ello a partir de un análisis donde comparan características de campo de los principales tipos de flujo y movimientos en masa en taludes de alta pendiente, proponen una clasificación general de movimientos en masa como una función de la fracción sólida y del tipo de material, esta clasificación se presenta en forma de elipse en la Figura 3-5. Los límites entre los diferentes movimientos en masa son sólo conceptuales y cualitativos, de hecho ellos pueden variar ampliamente dependiendo de la frontera específica, condiciones iniciales y propiedades físicas de los materiales. Coussot, (1992) ha propuesto criterios para algunos de esos límites: la transición de flujo de detritos a deslizamientos puede corresponder a la fracción sólida crítica y al tipo de material en el cual una fractura ocurre después de una deformación lo suficientemente grande; la transición de flujos hiperconcentrados a flujo de detritos podría corresponder a una fracción sólida crítica y tipo de material para el cual la caída de las partículas es omitible dentro del material durante un tiempo dado.

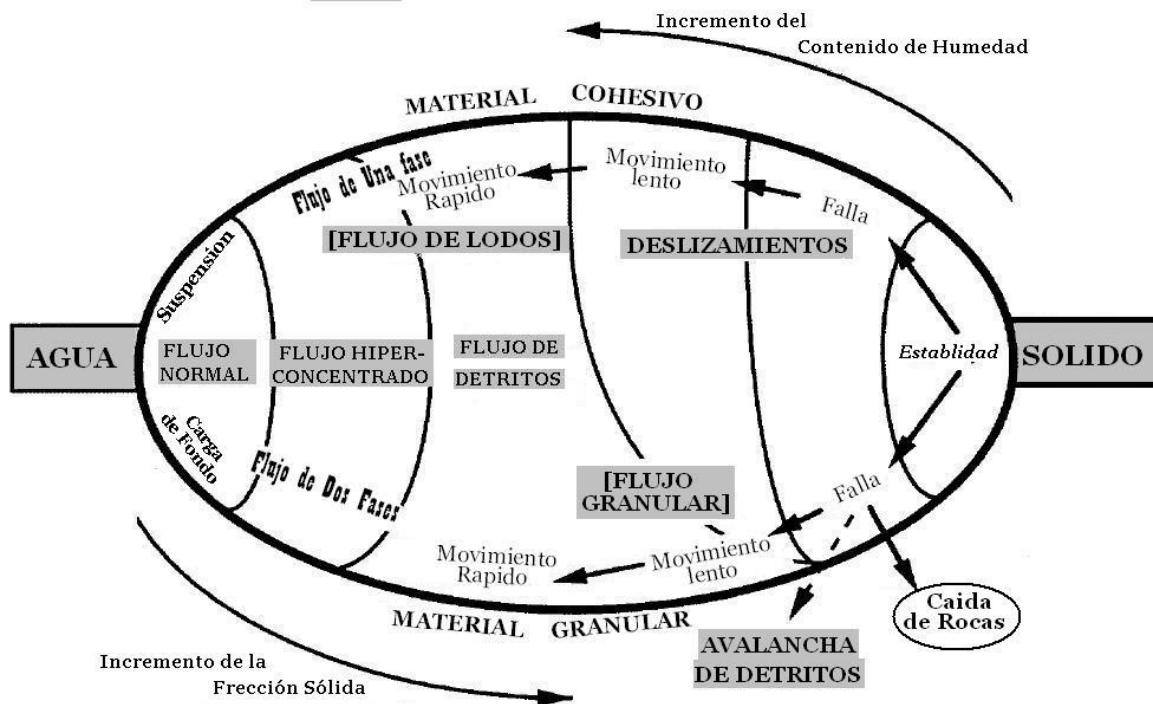


Figura 3-5. Clasificación de movimientos en masa sobre taludes como una función de la fracción sólida y el tipo de material (Coussot y Meunier,1996)

Características de los flujos de lodo y detritos

Estas son características típicas de los flujos de detritos obtenidas de algunos registros y que fueron citadas en Takahashi (1981):

Las velocidades de los flujos de detritos varían ampliamente debido no solo a las características de los detritos, tales como concentración, distribución de tamaños de grano, sino también por la forma del curso de tránsito (ancho, pendiente, etc.). Las velocidades observadas están entre 0.5 m/s y 20 m/s. Las densidades volumétricas también varían caso a caso, han sido reportadas mediciones desde 1400 Kg/m³ hasta 2530 Kg/m³. Estas densidades son equivalentes a una concentración en volumen de material sólido desde un 25% hasta un 70 u 80%, respectivamente.

Este tipo de flujos produce enormes fuerzas de impacto sobre obstáculos en su camino; sin embargo después de que el flujo sale y se expande sobre un terreno más plano, su poder se pierde rápidamente, a tal grado de no es raro que una casa sea cubierta hasta el alero sin experimentar daños serios. Esto probablemente sugiere que el flujo es tenue y lento en el momento de su detención.

Cuando el flujo se ha establecido, la masa se desplaza sobre el canal natural o sobre uno formado por ella misma, produciendo ruidos intensos debido al choque entre los clastos y de éstos con las paredes del cauce, y algunas veces produce chispas por fricción contra los lechos rocosos. En esta etapa, toma la apariencia de concreto fresco, pero al alcanzar el reposo se seca transformándose en un concreto pobre con gran cantidad de grietas de desecación.

La erosividad de los flujos de detritos en el área de origen es severa, se puede ver que en el fondo de la garganta es completamente pulido hasta el lecho rocoso, pero cuando el flujo está totalmente cargado tiene poco efecto erosivo, esto se puede ver en pavimentos de carreteras los cuales no han sido averiados por el paso del flujo.

Mecanismos de generación.

Rodríguez (1997) cita cuatro procesos de generación de flujos a saber:

1. Erosión intensa en las laderas de la cuenca de recepción durante lluvias excepcionales.

2. Deslizamientos en las laderas de la cuenca que se transforman de manera inmediata en flujos concentrados a lo largo de los cauces torrenciales, en este tipo de mecanismo se han identificado, a su vez, dos procesos diferentes: por una parte aquellos flujos asociados a deslizamientos de materiales con una alta saturación que al ser deformados adquieren una gran fluidez que le proporcionan su movilidad; por otro lado están aquellos formados por la carga generada por el deslizamiento sobre los materiales del lecho del cauce, algunos han identificado la generación como asociada con carga no drenada que conduce a la licuación del depósito (Sassa, 1984,1985) mientras que otros consideran la carga como un impulso aplicado al depósito.
3. Como un caso independiente del numeral anterior, está el de aquellos flujos generados por el rompimiento de presas naturales, las cuales pudieron ser originadas por deslizamientos que no contaron con la fluidez suficiente para transformarse en flujos inmediatamente (Takahashi, 1991).
4. Flujos concentrados, producidos por deshielos, generalmente asociados con actividad volcánica.

Generación de caudales sólidos y líquidos.

El caudal de un flujo de detritos depende de tres factores principales:

1. **Disponibilidad de agua:** La disponibilidad de agua debida a la lluvia, la saturación de los suelos subsuperficiales susceptibles a deslizarse y los caudales base de la corriente, así como el volumen de nieve y hielo de los nevados susceptibles a deshielo (Suárez, 2000).

Para Rodríguez, (1997), la descarga líquida total que pasa a través de un punto de control está determinada por los aportes totales menos las pérdidas y retardos generados dentro de la cuenca hasta dicho punto. De manera que para determinar el hidrograma de salida en el punto de control determinado como inicio de un flujo torrencial es de gran importancia conocer factores tales como la intercepción generalmente debida a la cobertura vegetal; la infiltración la cual depende de las condiciones antecedentes del suelo de la cuenca; el almacenamiento superficial el cual es función del microrelieve de la cuenca; así como la evapotranspiración y el flujo subsuperficial. Dentro de los métodos usuales para la determinación de

hidrogramas se encuentran: El Modelo Conceptual, Método del Hidrograma Urbano de Santa Bárbara, el Modelo Hidrodinámico, y el Método del Hidrograma Unitario (Rodríguez, 1997).

Usualmente se requiere determinar el flujo pico con una frecuencia determinada, lo cual puede hallarse sin necesidad de desarrollar el hidrograma completo. Rodríguez (1997) presenta algunos procedimientos recomendados para obtener estos valores: Método Racional, Método SCS – TR55, Método de las Frecuencias.

2. Disponibilidad de partículas sólidas: La descarga sólida involucrada en un flujo torrencial puede ser originada por los procesos de erosión natural o acelerada de las laderas de la cuenca, o por aportes puntuales producidos por deslizamientos tanto de las laderas como del lecho del torrente

Los volúmenes asociados con cada uno de estos mecanismos dependen de la intensidad con que éstos se presenten en la cuenca. La erosión es determinada por la erosividad del agua lluvia y su escorrentía al igual que por la erodabilidad del suelo de la cuenca.

Los volúmenes de sedimentos aportados por deslizamientos son más difíciles de predeterminar debido a la naturaleza aleatoria con que éstos pueden presentarse tanto en el tiempo como en el espacio. Como una primera aproximación se han tratado de relacionar los volúmenes de los deslizamientos con características de los agentes detonantes, como por ejemplo con la intensidad y duración de las lluvias (Ikeya, 1976), o con la magnitud de eventos sísmicos (Rodríguez, 1996).

Dadas las incertidumbres asociadas con la determinación de la descarga de sedimentos por fenómenos puntuales, ésta debe obtenerse por medio de análisis estocásticos que tomen en cuenta la probabilidad de falla inducida por los diferentes factores detonantes, y asociándola con los períodos de recurrencia de los eventos excepcionales, por encima de un nivel límite preestablecido, para cada caso. Con estos análisis se puede sectorizar la cuenca estableciendo zonas con igual probabilidad de falla asociada con un evento en particular, a partir de lo cual se pueden predeterminar volúmenes de material a producirse y a ser aportados por la cuenca y el fondo del torrente.

3. La morfología y tamaño de la cuenca: Al iniciarse una avalancha ésta posee un gran poder de erosión y puede cortar el cauce de la corriente en forma intensiva. A medida que va incorporando nuevos materiales sólidos y el agua de los poros, el caudal del flujo aumenta a lo largo de su curso.

Los caudales en una avalancha son generalmente muy superiores a los caudales calculados para el agua suministrada por la lluvia. La descarga máxima de una avalancha puede ser mucho mayor que el caudal inicial de agua limpia causado por la precipitación. Takahashi (1991) reporta avalanchas en las cuales la descarga pico fue de 60 veces el pico estimado de inundación, asumiendo sólo el caudal producido por las lluvias.

3.2 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo

En este sentido se adopta como marco conceptual el propuesto por Fell et al. (2004). Como complemento se adoptaron también las definiciones de Cruden y Fell (1997) y Nadim (2005).

Riesgo, medida de la probabilidad y severidad de un evento adverso para la vida, salud, la propiedad o medio ambiente.

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Pérdidas potenciales}$$

Manejo del riesgo, aplicación sistemática de políticas de manejo, procedimientos y prácticas a las tareas de identificación, análisis, evaluación, mitigación y monitoreo del riesgo.

Evaluación del Riesgo, estado en que los valores y el juicio entran en el proceso de decisión, explícita o implícitamente, considerando la importancia de los riesgos estimados y las consecuencias sociales, ambientales, y económicas asociadas, con el fin de identificar un rango de alternativas para el manejo del riesgo.

Análisis de riesgo, uso de la información disponible para estimar el riesgo debido a amenazas sobre individuos o poblaciones, la propiedad o el medio ambiente.

Descomposición o desintegración de las fuentes de riesgo en sus componentes fundamentales.

Estimación del riesgo, proceso de decidir si los riesgos que existen son aceptables y si las medidas de control actuales son adecuadas, si no son adecuadas, si las alternativas de control son justificadas o serán implementadas. Incluye el análisis y evaluación del riesgo.

Control del riesgo, implementación y solicitud de acciones para controlar el riesgo y la periódica re-evaluación de la efectividad de las acciones tomadas.

Mitigación del riesgo, aplicación selectiva de técnicas apropiadas y principios de manejo para reducir la posibilidad bien de la ocurrencia de un evento o de consecuencias desfavorables o ambas.

Riesgo tolerable, nivel de riesgo con el cual la sociedad puede convivir de manera que se garantice cierto beneficio neto. Es un nivel de riesgo que no se considera insignificante, por lo que se debe mantener vigilancia y de ser posible reducirse.

Riesgo individual, riesgo impuesto sobre una persona por la existencia de una amenaza. Este es adicional al riesgo antecedente o diario de que muera si no existiera la amenaza.

Riesgo social, posibilidad de generalización o extensión de un riesgo cuyas consecuencias pueden ser de tal escala que requieren de una respuesta socio/política.

Análisis cualitativo del riesgo, análisis que utiliza una forma verbal, descriptiva o escalas de valores numéricas para describir la magnitud de las consecuencias potenciales y la posibilidad de que esas consecuencias se presenten.

Análisis cuantitativo del riesgo, análisis basado en los valores numéricos de la probabilidad de la amenaza, vulnerabilidad y consecuencias, y resultan en un valor numérico del riesgo.

Amenaza, probabilidad de que un peligro particular ocurra dentro de un periodo de tiempo dado.

Probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de producir daño en un espacio e intervalo de tiempo determinado.

Peligro, evento natural que puede conducir al daño, descrito en términos geométrico, mecánico o cualquier otra característica. Puede ser uno existente o uno potencial.

Vulnerabilidad, grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo en el área afectada por la amenaza. Se expresa en términos de la probabilidad de daño (0) no hay daño y (1) pérdida total.

Elementos en riesgo, población, edificios, trabajos de ingeniería, infraestructura, medio ambiente y actividades económicas en el área afectada por la amenaza.

Consecuencias, efectos o el resultado de que la amenaza se materialice.

Posibilidad de ocurrencia (likelihood), probabilidad condicional de se presente un evento, dado una serie de datos, suposiciones e información.

Probabilidad, medida del grado de certeza. Esta medida va entre cero (imposible) y uno (completamente cierto).

Estadísticamente hablando se refiere a la frecuencia o fracción de ocurrencia de un evento dado entre un universo de posibilidades. De manera subjetiva se asocia con el grado de confianza.

Probabilidad temporal (espacial), probabilidad de que el elemento expuesto esté en el área afectada por la amenaza.

Frecuencia (recurrencia), medida de la posibilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo dado o en un número dado de ensayos.

Probabilidad anual de ocurrencia, la probabilidad estimada de que un evento de una magnitud específica sea excedido en un año.

3.3 Manejo del riesgo

De acuerdo con Fell et al. (2004), el proceso de manejo del riesgo incluye como elementos fundamentales, los presentados en la Figura 3-6.

Definición de los objetivos del análisis de riesgo, esta etapa es necesaria para definir los alcances del estudio. Incluye la definición de si lo que se requiere analizar es un sitio puntual o una zona (cuenca, subcuenca, etc.), determinar los límites geográficos del estudio, definir si el estudio llevará a un análisis en términos de pérdidas económicas o pérdidas de vidas o ambos. Igualmente debe definir el nivel de detalle (escala) en la que se tiene que levantar la información en campo, por ejemplo, geología, geotecnia, etc. Otros aspectos que deben definirse son el tipo de evaluación que se quiere entre cualitativa y cuantitativa, el criterio de aceptación del riesgo que se va aplicar o cómo se va a definir, las responsabilidades legales que se generen con el estudio y la forma como se van a entregar los productos.

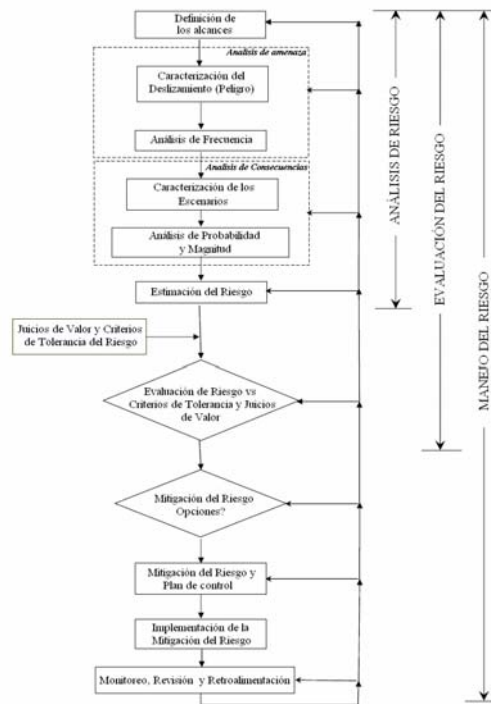


Figura 3-6. Esquema conceptual de los componentes necesarios para el Manejo del Riesgo.

Análisis de amenaza, el cual incluye la caracterización del peligro y la estimación de la frecuencia de ocurrencia de procesos de diferente magnitud.

En la caracterización del peligro se busca clasificar los mecanismos de falla potenciales, identificar el área potencialmente afectada o extensión del deslizamiento esperado, también características morfométricas del proceso como volumen. Es importante, igualmente, caracterizar los materiales que pueden estar involucrados en el proceso en términos de su comportamiento geomecánico, por ser este factor el que determine su comportamiento pre-falla y post-falla. Con el fin de estimar los daños potenciales que el movimiento puede producir, se requiere poder estimar o predecir la velocidad de movimientos, su trayectoria de viaje, etc. Para determinar la aplicabilidad de sistemas de alerta se debe tratar de identificar señales premonitorias como agrietamientos, ruidos, etc.

Los anteriores factores deben ser identificados para todas las posibles amenazas que pueden afectar el sitio, esto es las de menor magnitud pero mayor frecuencia, hasta las de mayor magnitud pero menor frecuencia.

A partir de la definición de amenaza se pueden identificar cinco elementos o características que deben ser identificadas en un ejercicio de zonificación, a saber:

- **Evento:** Elemento amenazante, en este caso un deslizamiento, este parámetro define el **tipo** de amenaza.
- **Probabilidad de ocurrencia:** Posibilidad de que se genere un deslizamiento, define la **intensidad** de la amenaza.
- **Capacidad de producir daño:** Efecto del deslizamiento sobre los elementos expuestos, este parámetro se define por la **magnitud** del elemento amenazante.
- **Espacio:** Define la **distribución espacial** de la amenaza.
- **Tiempo:** Define la **distribución temporal** de la amenaza.

En evaluación de la amenaza por deslizamientos el tipo de amenaza está definido por el tipo de deslizamiento, lo que está íntimamente relacionada con el sistema de clasificación de deslizamientos que se adopte. Para este proyecto se adoptará la clasificación propuesta por Varnes (1978) y complementada por Cruden y Varnes (1996).

Un mismo talud puede fallar de diferentes formas dependiendo de condiciones intrínsecas (litología, humedad, resistencia, etc.) y del efecto que sobre él ejercen agentes externos (lluvias, sismos, actividad humana).

Para un talud determinado, cada tipo de deslizamiento tiene asociada una probabilidad de ocurrencia diferente dependiendo de los agentes externos (detonantes) e intrínsecos (susceptibilidad).

Cada mecanismo de falla diferente produce daños, sobre los elementos expuestos, igualmente diferentes, debido a que la magnitud del elemento amenazante es variable.

Cada tipo de deslizamiento puede producir diferente nivel de daño sobre un mismo elemento expuesto. Físicamente esta capacidad está dada por la energía que el deslizamiento puede suministrar al elemento, la cual es función del mecanismo de falla y de las condiciones geométricas particulares (altura de caída, distancia de recorrido, etc.), las cuales definen la energía potencial disponible.

Usualmente se emplea una característica física del deslizamiento real o potencial para definir este factor. El mejor parámetro que puede representar la capacidad de daño de un movimiento es la velocidad de desplazamiento, la cual se relaciona directamente con la energía, sin embargo éste parámetro no es fácil de determinar o predecir, por lo que se ha adoptado por otras propiedades físicas del deslizamiento como el volumen de material o área afectada por el deslizamiento.

La evaluación de amenaza por deslizamiento, por lo tanto incluye no sólo la determinación de la probabilidad de que se genere un deslizamiento sino que además debe predecir el volumen o área potencialmente afectada, esto es la magnitud del elemento amenazante. La relación entre el parámetro seleccionado para definir la magnitud y la capacidad de producir daño es parte del análisis de vulnerabilidad que sigue al análisis de amenaza.

La distribución espacial de la amenaza es controlada, en principio, por la susceptibilidad de los taludes a deslizarse. La susceptibilidad se puede definir como la mayor o menor disposición de un talud a deslizarse, la cual es función de las condiciones intrínsecas como inclinación del talud, litología, cobertura, resistencia, condiciones de agua, etc.

La susceptibilidad debe ser vista como una variable dinámica debido a que la disposición de un talud a deslizarse es función de elementos variables en el tiempo como el contenido de humedad, resistencia o nivel del agua, entre otros.

Los primeros modelos de zonificación por amenaza se basaron en la determinación de la distribución espacial de la susceptibilidad, definida usualmente por la superposición con o sin ponderación de diferentes parámetros geométricos, litológicos y de cobertura, calibrados a partir de inventarios de deslizamientos en las zonas de estudio.

La distribución temporal de la amenaza está controlada por la recurrencia de los eventos detonantes y por la variación temporal de la susceptibilidad. La relación entre los eventos capaces de inducir deslizamientos y las características de los deslizamientos potenciales se establecen a partir del estudio de casos históricos o de análisis numéricos de la respuesta hidrológica y/o dinámica de taludes.

Con el estudio de casos históricos se pueden establecer los niveles críticos de lluvia o sismo capaces de generar deslizamientos, y del análisis estadístico de los registros de lluvias o sismos se obtiene la recurrencia del evento detonante dentro de un grado de confianza determinado.

El análisis de frecuencia se puede hacer en términos del número de procesos de ciertas características que pueden ocurrir en el sitio por año, o la probabilidad de ocurrencia de un evento en el sitio dentro de un periodo definido de tiempo (por

ejemplo, en un año), o bien como un análisis de confiabilidad con base en la relación entre las fuerzas resistentes y las inestabilizantes, este análisis debe hacerse para cada uno de los procesos analizados.

Existen varias formas de determinar frecuencias, entre ellas se tienen, el análisis de registros históricos de procesos en ambientes similares, modelos empíricos que relacionan la ocurrencia de procesos con los factores que los generan, uso de evidencia geomorfológica con registros históricos o evaluados a partir de la experiencia, evaluación directa por parte de un experto con base en un modelo conceptual (por ejemplo un árbol de decisión), modelación de una variable primaria, por ejemplo la variación de las presiones de poros o el nivel freático, aplicación de modelos probabilísticos a un análisis de estabilidad o una combinación de los métodos anteriores.

Para el caso de flujos de detritos, la amenaza se debe asociar a un parámetro hidráulico crítico que defina la magnitud de esta amenaza, en cuyo caso se definiría como la probabilidad de ocurrencia de un evento de una magnitud dada, en este caso definida por un valor de profundidad o de velocidad de flujo, capaz de producir daño en un tiempo y espacio determinado.

Usualmente, como se verificó de la revisión bibliográfica sobre el tema, los análisis de amenaza por inundaciones y flujos se basan en mapas de inundación para eventos de lluvia de un determinado periodo de retorno. Este tipo de análisis tienen la ventaja de que para diferentes periodos de retorno se pueden estimar las pérdidas esperadas anuales y con ello construir curvas de riesgo, sin embargo, este tipo de análisis se aleja de la definición formal de amenaza.

En el presente trabajo se definió la amenaza a partir de niveles críticos asociados con el potencial de daño, los cuales no han sido objeto de estudios juiciosos, de manera que la definición de los niveles críticos se ha basado en conceptos puramente empíricos tales como una profundidad de flujo crítica de 0.8m por ser aquella en que se empiezan a afectar los elementos dentro de una estructura. En otros casos se considera que la velocidad de flujo es la que define el potencial de daño de un flujo, sin embargo los niveles adoptados no han sido suficientemente justificados.

Para el presente caso se adoptaron varios parámetros hidráulicos del flujo, a saber: profundidad de flujo, velocidad de flujo, caudal unitario y número de Fraude, y para cada uno de ellos se adoptaron diferentes valores críticos, los cuales se identificaron durante la revisión de metodologías de evaluación de amenaza por flujos e inundaciones, tal como se explica en el Capítulo 5-Metodología.

La definición de la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de los parámetros hidráulicos requiere de la modelación del flujo para varios periodos de

retorno de manera que para cada unidad de trabajo (celdas, predios, etc.) se puede construir una curva de parámetro hidráulico, por ejemplo profundidad de flujo, contra la probabilidad de ocurrencia de dicho valor.

Para la definición de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la zona piloto, se hizo un análisis de sensibilidad de estos en función de los parámetros críticos analizados y se definió que una profundidad de 1.0m es un valor que marca un cambio significativo en la distribución espacial de la vulnerabilidad y riesgo, por lo que este valor fue adoptado y se recomienda para posteriores análisis.

En términos de la distribución espacial de la amenaza los valores de profundidad o velocidad son obtenidos de la modelación del tránsito del flujo y son usualmente los datos de salida de las herramientas de análisis disponibles.

Análisis de consecuencias, es la identificación de todos los elementos expuestos a la amenaza y la determinación de los posibles daños que cada elemento expuesto puede experimentar bajo la materialización de la amenaza.

Esta etapa incluye la identificación y cuantificación de todos los elementos expuestos, estimar la probabilidad espacial de los elementos expuestos, esto es la exposición temporal ante la amenaza, la evaluación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos en términos de las pérdidas económicas o vidas humanas. Este análisis se debe hacer para cada tipo de proceso que se pueda presentar. La evaluación de posibles daños debe incluir tangibles e intangibles, directos e indirectos.

Los elementos en riesgo pueden ser seres humanos, la infraestructura física, los servicios (líneas vitales), vehículos, bienes individuales y comunales, el medio ambiente y la economía, la inclusión de estos elementos lleva a que el manejo de riesgo sea parte de las estrategias del desarrollo sostenible de una comunidad.

Con el fin de determinar los daños se debe primero estimar la probabilidad de que un deslizamiento alcance el elemento expuesto, la cual depende de la posición relativa del elemento con respecto a la zona de origen y trayectoria del deslizamiento.

Para elementos que estén sobre la zona potencialmente inestable esta probabilidad es de 1.0, para elementos por debajo de la zona potencial deslizada la probabilidad depende de la distancia de viaje del movimiento, para personas y vehículos la probabilidad depende del tiempo de exposición del elemento, en el caso de elementos en movimiento depende de la velocidad de desplazamiento y las veces que pasa a través de la trayectoria del evento.

La probabilidad temporal se refiere a la probabilidad de que el elemento expuesto esté en el momento en que se materialice la amenaza. Para elementos fijos esa probabilidad es de 1.0, mientras que para elementos temporales depende de la frecuencia de exposición a la zona potencialmente inestable. Para un vehículo que pasa bajo la zona será la proporción de tiempo, que durante el año, este pasa por la trayectoria del movimiento. Para personas en un edificio, la probabilidad será la proporción de tiempo en un año que la persona ocupe la edificación.

La vulnerabilidad definida como el nivel de daño potencial es la probabilidad de que se presente cierto nivel de daño, lo cual se obtienen a partir de curvas de fragilidad o de daño, las cuales relacionan la magnitud de la amenaza con el nivel de daño esperado para un determinado elemento expuesto. Este nivel de daño estará asociado con el tipo de sollicitación (carga) que el movimiento trasmite al elemento expuesto. En el caso de personas la vulnerabilidad depende de la posibilidad de que la persona escape del movimiento, lo que está relacionado con que ella esté en campo abierto o dentro de algún otro elemento, como una edificación o un vehículo.

A nivel social la vulnerabilidad es el grado en que un sistema o parte del sistema pueden reaccionar adversamente ante la materialización de la amenaza. La respuesta está condicionada por la resiliencia del sistema, que a su vez se puede definir como la capacidad del sistema de absorber y recuperarse después de ocurrido el evento.

En este sentido la CEPAL-BID (2000) define vulnerabilidad como la probabilidad de que una comunidad, expuesta a una amenaza natural, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político-institucional y otros), pueda sufrir daños humanos y materiales.

Buckle (1995) habla de la vulnerabilidad como una medida de hasta que punto un evento potencial puede acabar o dañar los recursos disponibles, de tal forma que el restablecimiento de las condiciones de vida usuales no pueden realizarse dentro de un periodo razonable. En este sentido la vulnerabilidad puede medirse como una proporción de daño de los recursos ilesos, además, agrega el concepto de elasticidad a la definición de vulnerabilidad, identificando el potencial en los efectos sociales, económicos y medioambientales, e introduciendo la asociación entre vulnerabilidad y la habilidad de recuperación.

Cutter (2001) define la vulnerabilidad como el grado de exposición, la capacidad de sufrir el daño y el grado en que los diferentes grupos sociales se encuentren en riesgo. Involucra también la importancia de decir que “la vulnerabilidad varía con la situación (o espacio) y con el tiempo - tiene dimensiones temporales y espaciales. Estos muchos tipos de vulnerabilidad son de interés para la comunidad, pero tres

son los más importantes: individual, social, y biofísica. La vulnerabilidad individual es la susceptibilidad de una persona o estructura al daño potencial de las amenazas. La vulnerabilidad social describe las características demográficas de grupos sociales que los hacen más susceptibles a los impactos adversos. La vulnerabilidad social sugiere que las personas han creado su propia vulnerabilidad, principalmente a través de sus propias decisiones y acciones. La vulnerabilidad biofísica examina la distribución de condiciones de riesgo que se originan de una variedad de eventos iniciales como los riesgos naturales, la contaminación química o los accidentes industriales, entre otros.

Vulnerabilidad física

Se refiere al nivel de daño que puede sufrir un elemento expuesto en términos de su exposición y resistencia contra la magnitud de la amenaza, en el caso de flujos es el nivel de daño que se puede presentar por diferentes velocidades y alturas de flujo.

Los tipos de daños en estructuras se pueden clasificar en términos generales como:

1. *Superficial (cosmético o daños menores)*: no se compromete la funcionalidad de las estructuras y el daño puede ser reparado rápidamente y a bajo costo.
2. *Funcional o daño medio*: donde se compromete la funcionalidad de la estructura y las reparaciones toman tiempo y los costos son significativos.
3. *Estructural o severo/total*: cuando las estructuras son severamente dañadas o destruidas que necesitan altos costos por demolición y reconstrucción.

La vulnerabilidad de una estructura depende de:

1. Tipo de estructura
 - Sistema estructural
 - Naturaleza de los elementos estructurales
 - Tamaño de la estructura, número de pisos, espacio ocupado, etc.
 - Regularidad vertical y horizontal
 - Edad
 - Mantenimiento

2. Materiales
3. Prácticas constructivas
4. Calidad de la mano de obra

La vulnerabilidad individual de una persona sometida al impacto de un evento amenazante tipo flujo depende de:

1. Volumen del flujo.
2. Velocidad de movimiento.
3. Profundidad del flujo.
4. Si los detritos sepultan a la persona.
5. Si la persona está en campo abierto o dentro de una estructura o vehículo.
6. Si la estructura o vehículo colapsan.
7. Tipo de colapso de la estructura o vehículo.

Para el análisis de vulnerabilidad física por flujos, durante la revisión bibliográfica se encontraron pocos estudios donde se define el nivel de daño asociado con algún parámetro hidráulico, la gran mayoría de los análisis define un Índice de Vulnerabilidad de manera subjetiva (cualitativa), el cual representa un potencial nivel de daño, el cual no se asocia con algún nivel de profundidad o velocidad. En el caso de la modelación física de la vulnerabilidad, algunos de los estudios consideran las presiones del agua sobre la estructura y a partir de un análisis estructural se definen curvas de fragilidad. Debido a las diferencias en sistemas constructivos, en materiales y calidad y mantenimiento de las construcciones, los resultados de esos estudios no son aplicables a nuestro medio, de manera que para el presente estudio se hizo una modelación física de la respuesta estructural ante diferentes valores de amenaza, como se explica en el Capítulo 5- Metodología.

Vulnerabilidad social

Bikerman (2006 a) resalta que un desastre debe ser visto, mas que la ocurrencia de un evento físico que requiere de grandes inversiones para ser controlado, como la compleja interrelación entre eventos físicos potencialmente dañinos y la vulnerabilidad de la sociedad, su infraestructura, economía y medio ambiente, la

cual está determinada por el comportamiento del ser humano. De aquí que se definan diferentes vulnerabilidades; física, social, económica y ambiental.

Una definición general de la vulnerabilidad es utilizada por el autor, en la cual vulnerabilidad se refiere a las condiciones físicas, sociales, económicas y ambientales que incrementan la susceptibilidad de la comunidad al impacto de las amenazas. Otras definiciones consideran la vulnerabilidad como una condición humana determinada por aquellos factores físicos, sociales, económicos y ambientales que determinan la probabilidad y escala de los daños potenciales debido a una amenaza. Bikerman (2006a) menciona una serie de características relacionadas con la vulnerabilidad, a saber:

- Multi dimensional y diferencial, significa que varía en el espacio y entre diferentes grupos sociales.
- Dependiente de la escala, en relación con el tiempo y el espacio y en las unidades de análisis que pueden ser individuos, comunidades, regiones, etc.
- Dinámica, las características de la vulnerabilidad y sus factores cambian con el tiempo.

Por otra parte se identifica que existen algunas características que deben ser descritas para definir la vulnerabilidad social:

- Bienestar inicial, estado nutricional, salud física y mental.
- Supervivencia y resiliencia, objetos, capitales, ingresos y formación.
- Auto protección, capacidad y destreza para construir una casa segura, uso de un sitio seguro.
- Protección social, preparación y medidas de protección.
- Redes sociales y políticas e instituciones, capital social, ambiente institucional.

Estos factores determinan la forma como la comunidad experimenta y responde al impacto negativo de un evento.

El concepto de vulnerabilidad social no sólo incluye la fragilidad social, sino que también incluye aspectos como inequidades sociales tales como ingresos, edad o género, así como factores relacionados con las características de la comunidad y la construcción de su ambiente tales como la urbanización, tasa de crecimiento y vitalidad económica.

Bikerman (2006a) menciona que Downing et al. (2006) enfatizan que la vulnerabilidad social es:

- La exposición diferencial a los esfuerzos experimentados o anticipados soportados por las diferentes unidades expuestas.
- Un proceso dinámico.
- Basada en las acciones y múltiples atributos de los actores humanos.
- A menudo determinada por el tejido social en lo social, político, económico y ambiental.
- Manifiesta simultáneamente en más de una escala.
- Influenciada y definida por múltiples solicitudes.

La capacidad de soportar un evento se define como la resistencia y recursos disponibles dentro de la comunidad u organización que reducen el nivel de riesgo, o los efectos de un desastre.

En términos más generales y considerando la vulnerabilidad social, la amenaza se define como un evento físico o actividad humana que puede causar pérdida de vidas, daño a la propiedad, alteración social y económica o degradación ambiental.

El término resiliencia puede ser entendido como la capacidad de absorber alteraciones, en este sentido, está relacionado más con la resistencia del sistema, por otra parte, el término también ha sido empleado para definir la habilidad de regeneración de un sistema social o ambiental, en este caso se incluye la habilidad de aprender y adaptarse a los cambios mientras se mantienen su funcionalidad principal.

Bikerman presenta un esquema conceptual que incluye las diferentes definiciones de vulnerabilidad como fases del mismo concepto más que diferentes conceptos. Este esquema muestra las siguientes fases:

- Vulnerabilidad como un factor interno de riesgo: capacidad física para estructuras, condiciones socio-económicas y estructura institucional para una sociedad, y ecosistemas y capital ambiental para las funciones ambientales.
- Vulnerabilidad como la posibilidad de experimentar heridas, o la muerte, pérdida y alteración de la subsistencia por un evento extremo, o la presencia de dificultades inusuales para recuperarse de los efectos de un evento. Esta fase está centrada en las condiciones del ser humano.
- Vulnerabilidad como una aproximación dualística entre la susceptibilidad y la capacidad de soportar un evento. Esta dualidad incluye por una parte factores internos y por otra, factores externos que definen dos aspectos importantes, por un lado la exposición y por otra la capacidad interna de soportar el evento incluyendo la capacidad de anticipación.
- Vulnerabilidad como una estructura múltiple: susceptibilidad, sensibilidad, capacidad de soportar el evento, exposición y capacidad de adaptación.
- Vulnerabilidad como un concepto multi-dimensional: el cual incluye la física, social, económica, ambiental e institucional.

Los anteriores conceptos han llevado a la formulación de diferentes modelos conceptuales de la vulnerabilidad tal como se presenta en el Capítulo 4, *Marco Teórico*.

De acuerdo con Bikerman (2006 a), la habilidad de medir la vulnerabilidad es un requisito principal para poder reducir el riesgo, esta medición no se refiere exclusivamente a la determinación cuantitativa de factores o parámetros sino que también se refiere al desarrollo de técnicas y métodos de traducir conceptos abstractos en herramientas prácticas para definir la vulnerabilidad. Esto implica que medir la vulnerabilidad incluye el uso de indicadores cuantitativos, criterios cualitativos y técnicas modelos de evaluación más generales como por ejemplo para capturar los aspectos institucionales de la vulnerabilidad.

Gallopin (1997) definió un indicador como un signo (señal) que resume información relevante de un fenómeno particular. Una definición más precisa considera un indicador como una variable que es una representación operacional de un atributo, tal como la calidad o características de un sistema. En consecuencia el autor define un indicador de la vulnerabilidad como: *“una variable que es una representación operacional de una característica o calidad de un sistema, capaz de suministrar información relacionada con la susceptibilidad, capacidad de resistir y resiliencia de un sistema ante el impacto de un evento asociado con una amenaza natural.”*

La definición anterior implica que el indicador tiene un significado más allá de su valor, y su relevancia está en la capacidad de interpretación que se tenga de dicho indicador con relación al factor que representa. Por ser una variable, el indicador puede ser cuantitativo nominal, un rango ordinal o cualitativo.

El proceso de generación de indicadores necesita estar relacionado, explícita o implícitamente, a los objetivos o metas (goals), o al menos a una visión que sirva de base para definir el estado o la característica de interés. En el proceso de evaluación es importante definir primero los objetivos y a partir de ellos definir los indicadores relevantes, se debe tener en cuenta que lo importante no es el indicador por si mismo, sino lo que representa. La calidad del indicador la define la habilidad de este al indicar la característica del sistema que es relevante con el objetivo que se le asigne, esta relación se observa esquemáticamente en la Figura 3-7, en la que se muestra que el desarrollo de un indicador debe recoger información y definir objetivos que definan la característica de interés.

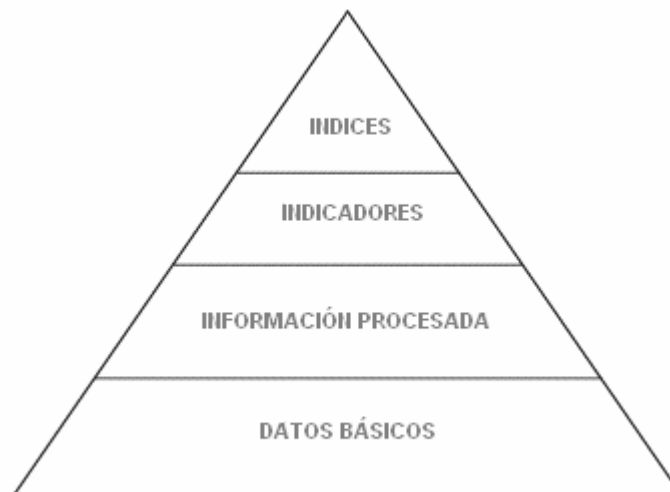


Figura 3-7. Pirámide de datos.

En el caso de indicadores de vulnerabilidad, los objetivos generales incluyen, como ejemplo, reducir la vulnerabilidad de comunidades potencialmente afectadas por un evento, mientras que el objetivo específico puede formularse como la reducción de muertos o el incremento de la capacidad financiera de una persona con el fin de reducir su vulnerabilidad y mejorar su posibilidad de recuperación económica. En general se pueden establecer dos tipos de relación indicador-objetivos:

- El primero se refiere a que el indicador muestre la tendencia de desarrollo que se presenta, esto es si la tendencia es a un mayor o menor desarrollo, esto refleja una menor o mayor vulnerabilidad.
- El segundo caso busca que el indicador muestre si se ha llegado a un estado de desarrollo específico. Esto requiere de la definición de objetivos específicos muy precisos y se debe determinar si el objetivo determina una mayor o menor vulnerabilidad. En este caso la definición de objetivos específicos desde el punto de vista social y ambiental no es sencilla.

Muchos indicadores no son capaces de determinar un valor absoluto de vulnerabilidad, por lo que usualmente se definen indicadores relativos que permiten diferenciar áreas o grupos con mayor o menor vulnerabilidad.

Los indicadores deben ser variables que agrupen información a partir de datos que permitan la toma de decisiones a partir de un juicio de valores basado en la experiencia, entendimiento y principios. Esto define diferentes funciones que debe cumplir un indicador, por un lado, el de permitir el entendimiento de la vulnerabilidad y de los factores que la controlan y por otro el de servir de parámetro para la toma de decisiones sobre las acciones que se deben seguir para reducir la vulnerabilidad o aumentar la capacidad de resistir los efectos de un evento o mejorar la capacidad de recuperación. En este sentido se han definido las siguientes como las principales funciones de un indicador:

- Establecer prioridades.
- Proporcionar antecedentes sobre las acciones a seguir.
- Incrementar la alerta.

- Permitir el análisis de tendencias.
- Generar autoridad (empowerment).

Otras funciones que se les pueden atribuir a los indicadores son:

- Simplificación (reducción de la complejidad).
- Comparación entre lugares y situaciones.
- Anticipación a condiciones futuras y tendencias.
- Evaluación de las condiciones y tendencias con relación a los objetivos.

En general se pueden establecer nueve pasos para la definición de indicadores:

- Definición de tareas: definición o selección de los objetivos relevantes.
- Definición de los objetivos del indicador, identificando el grupo objetivo y el propósito asociado al indicador (relación objetivo y función). Es importante definir los límites temporal y espacial, lo que permite determinar el marco temporal en que se van a medir los indicadores y definir la unidad de análisis (individuo, comunidad, sub-región, región económica, zona geográfica o unidad administrativa).
- Identificación de un marco conceptual apropiado: esto es definir los temas e indicadores apropiados.
- Definición de los criterios de selección de los indicadores apropiados: basado en el tema, funciones y objetivos buscados. Se debe incluir aquí un análisis de la calidad y disponibilidad de los datos.
- Identificación de un grupo de indicadores potenciales: existen diferentes propuestas de indicadores potenciales, en general relacionados con el marco conceptual que se maneje, estos deben ser coherentes con la escala de trabajo.

- Selección de los indicadores: con base en los criterios de selección y en el listado de indicadores potenciales se definen los que permiten de mejor forma cumplir con los objetivos.
- Análisis de los resultados de los indicadores: una vez definidos los indicadores apropiados se procede a la recolección de la información necesaria para obtenerlos y la verificación de la aplicabilidad del método.
- Preparación y presentación de un informe.
- Evaluación del comportamiento del indicador.

Los criterios de calidad que se han definido para el desarrollo de un indicador son:

- Que sea cuantificable (medible).
- Que sea relevante, esto es que represente una característica que sea importante sobre el tema que se está tratando.
- Políticamente relevante.
- Debe medir solamente factores importantes en lugar de tratar de indicar todos los aspectos.
- Sano analítica y estadísticamente.
- Entendible.
- Fácil de interpretar.
- Ser sensible y específico para describir el factor que se quiere analizar.
- Válido y preciso.
- Reproducible.
- Basado en datos disponibles.
- Debe permitir la comparación de los datos.
- Debe cumplir un objetivo específico.

- Efectivos en términos de costo.

Los criterios utilizados para escoger los indicadores dependen del marco conceptual que se utilice. Algunos modelos se basan en información obtenida directamente de los individuos e instituciones y no se refieren a la información secundaria que se pueda obtener, de manera que el listado anterior debe utilizarse como una guía y cada modelo en particular debe definir el peso o importancia que se le de a estos criterios.

Se debe hacer una distinción entre evaluación de daños, evaluación del impacto y la evaluación de la vulnerabilidad. Aunque estos conceptos se superponen en algunos aspectos, no significan ni comprenden lo mismo. La evaluación de daños se basa en el cálculo de pérdidas reales tales como número de muertos, pérdidas económicas y daños a la infraestructura física. El análisis del impacto no necesariamente se refiere a los daños, también incluye los potenciales beneficios, y finalmente la evaluación de la vulnerabilidad se refiere a la determinación de la posibilidad de que se presenten heridos, pérdida o interrupción del bienestar y de otros factores que dificulten la recuperación, esto significa que la vulnerabilidad debe focalizarse en la determinación de aquellos factores que hacen a la población vulnerable y que muestran las mayores diferencias en la susceptibilidad de las personas.

Evaluación del riesgo, esta etapa comprende la estimación del riesgo o daños potenciales y la comparación de ese valor con un nivel de riesgo aceptable.

La estimación del daño potencial es el producto de la amenaza por las consecuencias de la manera como se definió anteriormente. El resultado se puede presentar de diferentes formas: como un número de pérdidas esperadas por año o número de víctimas esperadas en un año; también se puede presentar como gráficas f-N, que representan para cierto nivel de costos o víctimas cuál es la frecuencia probable de ocurrencia de ese nivel de daño; con base en las anteriores se pueden construir curvas de frecuencia acumulada contra nivel de daño, curvas F-N.

La comparación de los resultados de la estimación del riesgo con el riesgo aceptable y el riesgo tolerable define la necesidad de implementar un esquema de mitigación del riesgo. Cuando el riesgo calculado es menor que el aceptable no se requiere intervención, cuando el calculado es mayor que el aceptable pero menor que el tolerable se debe decidir si se interviene o no, de cualquier forma se debe hacer seguimiento y monitoreo de la amenaza. Cuando el riesgo calculado es mayor que el riesgo tolerable se debe implementar un sistema de mitigación.

La Sociedad Australiana de Geotecnia (AGS, por sus siglas en Inglés) presentó los criterios de riesgo aceptable y tolerable, en términos de vidas humanas, que se muestra en la Figura 3-8. Adicionalmente, algunos autores proponen criterios para las pérdidas económicas como se muestra en la Figura 3-9.

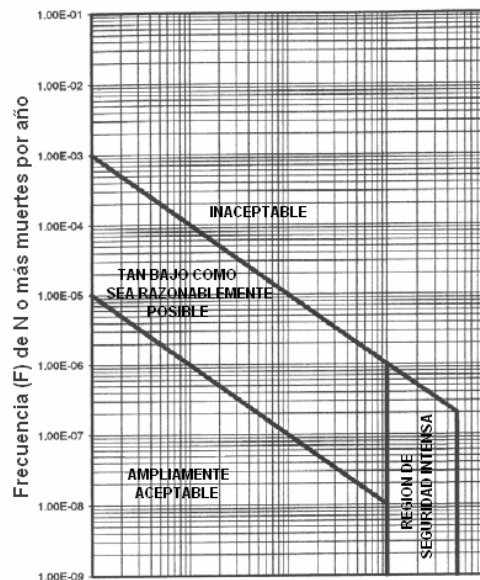


Figura 3-8. Criterios de riesgo aceptable.

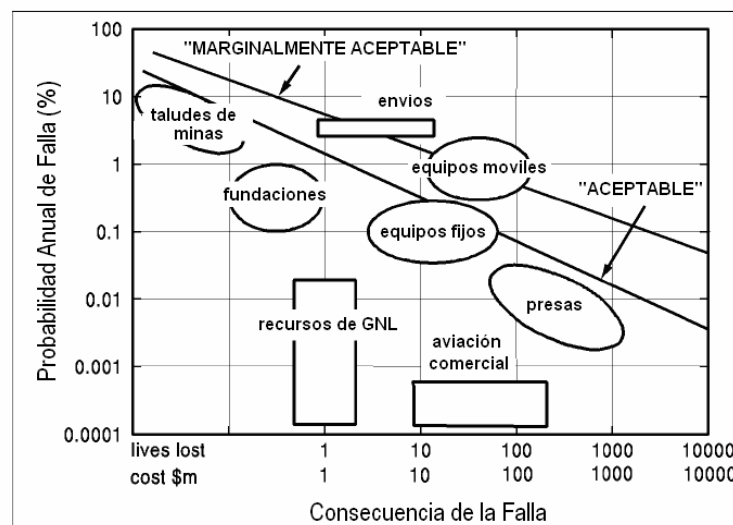


Figura 3-9. Criterios de riesgo aceptable para pérdidas económicas.

Los límites de riesgo tolerable propuesto por la AGS se presentan en la Tabla 4- 1. En el caso del riesgo aceptable proponen que sea un orden de magnitud menor a los reportados en esta Tabla.

Situación	Riesgo tolerable sugerido
Taludes artificiales existentes	10^{-4} /año para la persona que mayor riesgo presenta 10^{-5} /año para el promedio de personas en riesgo
Taludes artificiales nuevos	10^{-5} /año para la persona que mayor riesgo presenta 10^{-6} /año para el promedio de personas en riesgo

Tabla 3-1. Límites de riesgo tolerable, AGS.

Mitigación del riesgo, se refiere a las estrategias que se pueden implementar para reducir el riesgo a niveles aceptables.

El resultado de la evaluación del riesgo puede ser:

- El riesgo es tolerable o aún aceptable y no requiere de medidas de mitigación.
- El riesgo es intolerable y se necesita adoptar medidas de mitigación.

El proceso de mitigación del riesgo es iterativo donde se requiere la consideración de diferentes alternativas de mitigación y los resultados de aplicar cada una y el monitoreo posterior.

Las opciones de mitigación del riesgo se pueden resumir en:

- Reducir la frecuencia de deslizamientos aplicando medidas de estabilización tales como drenajes, reconfiguración del terreno, anclajes, etc.
- Reducir la probabilidad de que el deslizamiento alcance los elementos en riesgo, por ejemplo construcción de mallas, etc.
- Reducir la probabilidad espacial y temporal de los elementos en riesgo, instalando sistema de alerta, relocalizando, etc.

Otras opciones del manejo del riesgo incluyen:

- Evitar el riesgo, abandonar el proyecto, buscar alternativas o generar el proyecto de manera que se reduzcan el riesgo.
- Transferir el riesgo, trasladar la decisión a otra autoridad o compensar el riesgo a través de seguros.
- Posponer la decisión si existe una gran incertidumbre en espera de resultados de nuevas investigaciones.

Otras actividades necesarias incluyen:

- Educación pública.
- Sistemas de información pública.

3.4 MARCO CONCEPTUAL DEL PROYECTO

En el presente proyecto se estimó el riesgo cuantitativamente determinando las pérdidas económicas anuales potenciales para diferentes escenarios de análisis definidos por lluvias y sismos de diferentes periodos de retorno. La amenaza se definió como la probabilidad anual de ocurrencia de algún parámetro del flujo; con el fin de hacer un análisis de sensibilidad en este trabajo se consideraron diferentes profundidades de flujo, diferentes velocidades, diferentes caudales unitarios, definidos por el producto de la profundidad por la velocidad y diferentes valores del número de fraude.

El flujo se compone de caudales líquidos y caudales sólidos. Los caudales líquidos se estimaron a través del análisis hidrológico de la cuenca, el cual se basó en las metodologías de la Soil Conservation Service (SCS), mientras que para la determinación de los caudales sólidos se consideraron diferentes escenarios, en términos de los procesos que durante un evento de lluvia y sismo podían aportar sedimentos al flujo. Estos escenarios fueron determinados por caudales que

además de los volúmenes de agua incluían sedimentos por erosión, sedimentos por inestabilidad de las bancas y sedimentos por inestabilidad de las laderas.

El análisis de erosión se basó en la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo con algunas modificaciones para ajustarlo a las condiciones locales. Para incluir la componente sísmica se hicieron análisis de estabilidad pseudoestáticos incluyendo las aceleraciones esperadas en el sitio de análisis, las cuales se obtuvieron de un estudio de amenaza sísmica y un análisis de amplificación local.

El tránsito de los flujos se hizo utilizando el software FLO 2D, para el cual se determinaron puntos de control, en los cuales se estimaron los caudales líquidos y sólidos a partir de sus áreas aferentes de aporte. Para cada uno de los escenarios se definieron los aportes líquidos y sólidos en los puntos de control y la modelación consistió en la estimación de alturas de flujo y velocidad en las diferentes celdas de una grilla que se tomo para el análisis.

Debido a que cada escenario estaba asociado con una lluvia y/o sismo de un periodo de retorno definido, cada uno de ellos tenía una probabilidad anual de ocurrencia dado, de manera que para los diferentes parámetros hidráulicos se puede construir una curva de probabilidad, a partir de la cual se obtienen la probabilidad de ocurrencia de una profundidad o velocidad dada.

La vulnerabilidad física de las estructuras se definió a partir de las derivas causadas por las presiones de agua, las cuales se determina a partir de una presión estática y una presión hidrodinámica, cada una de ellas se reemplazó por una altura equivalente y a partir de la modelación de respuesta estructural, que se hizo utilizando el software ETABS, se determinaron las deformaciones. A través de curvas de deriva contra niveles de daño que se han utilizado para el análisis de amenaza sísmica se determinó el porcentaje de daño esperado para los diferentes niveles de los parámetros hidráulicos analizados.

En el caso de vulnerabilidad física para las personas, ésta se define como la probabilidad de muerte debido a una profundidad o velocidad de flujo dado, no se encontró ningún estudio que identificará las probabilidades de muerte asociadas con diferentes valores de altura de flujo o velocidad, solamente se identificaron algunas propuestas empíricas, a partir de las cuales se definieron algunos valores igualmente empíricos.

La vulnerabilidad social se determinó a partir de un índice de vulnerabilidad construido a partir de indicadores, los cuales se agruparon en tres factores principales, a saber: exposición, vulnerabilidad y capacidades. Cada indicador se calificó en tres niveles; alto, medio y bajo, asignándole un valor numérico a cada nivel. Por otra parte a cada factor y a cada indicador se les asignó un valor de

peso para obtener el índice de vulnerabilidad social como la suma ponderada de los indicadores.

El riesgo, visto como el nivel de pérdidas económicas potenciales anuales se determinó como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad por el costo de la estructura o el predio. Para la estimación de este riesgo se identificaron todos los predios y las construcciones o coberturas en ellos. En el caso de predios semi-urbanos y urbanos las estructuras se tipificaron con base en sus componentes arquitectónicas y estructurales, a partir de lo cual se estimó su costo. En los predios rurales a cada tipo de cobertura igualmente se le determinó su costo.

El riesgo social, definido como el nivel de afectación anual a las personas se definió a partir del número de personas potencialmente afectadas al año. Para esto se determinó para cada predio una densidad de población promedio, de acuerdo con el censo de 2005 y se obtuvo la sumatoria de todos los predios afectados por los flujos. Por otra parte se determinó el número esperado de pérdidas humanas anual como el producto de la amenaza, la vulnerabilidad física de las personas, la vulnerabilidad social y la exposición temporal.

Los diferentes escenarios fueron comparados a partir del riesgo económico y social asociado con cada uno de ellos, a partir de lo cual se determinaron las estrategias de gestión del riesgo a implementar.

La Mapa Conceptual Anexo muestra esquemáticamente el proceso que se utilizó en el presente trabajo para el análisis de riesgo. Las actividades, procedimientos y herramientas utilizados para la obtención de los productos parciales y el producto final, se describen con detalle en los Capítulos 4-Marco teórico y Capítulo 5-Metodología.

CAPITULO 4

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los modelos y teorías en los que se basa cada una de las etapas del estudio. Se describen igualmente los procesos adoptados para la obtención de resultados para la zona piloto. La secuencia en que se presentan estos elementos siguen el orden en que se desarrolló el proyecto, de acuerdo con la estructura conceptual presentada en el Capítulo 3-Marco Conceptual.

Se presentan inicialmente los conceptos asociados con las actividades básicas, siendo estas las que se requieren para la obtención de la información primaria como la topografía, geología, entre otros y el análisis de esta información para definir los parámetros y factores que requieren los procesos de cálculo, como por ejemplo el análisis de imágenes para definir coberturas. Posteriormente se describe los métodos de análisis de los procesos utilizados para la obtención de los resultados parciales, tales como los análisis de estabilidad y modelación del flujo, entre otras. Por último se describen los procesos para la obtención de los resultados finales tales como los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

4.1 Geología

El mapa geológico es la representación en dos dimensiones de la intersección de los diferentes elementos geológicos con la superficie terrestre, por lo tanto un mapa geológico debe presentar dos tipos de información, la topográfica y la geológica, Figura 4-1. Los siguientes conceptos han sido tomados de Pozo et al. (2004).

Topografía: Una pieza básica, para el inicio del trabajo de geología, es una representación de los elementos que componen el terreno, esto es un mapa topográfico, el cual permite elaborar mapas temáticos como la geología y la geomorfología. La escala de captura de información está definida por la escala de dicho mapa topográfico. Un mapa geológico completo debe presentar la información altimétrica (curvas de nivel, etc.), la información planimétrica (escala, coordenadas, etc.) y la información toponímica necesarias para la correcta interpretación de la estructura geológica.

Geológica: Los elementos geológicos que se incluyen en el mapa geológico son volúmenes o planos. Los volúmenes se refieren a estratos o capas mientras que

los planos se refieren a los contactos, de manera que en un plano bidimensional estos elementos quedan representados por áreas o líneas, respectivamente.

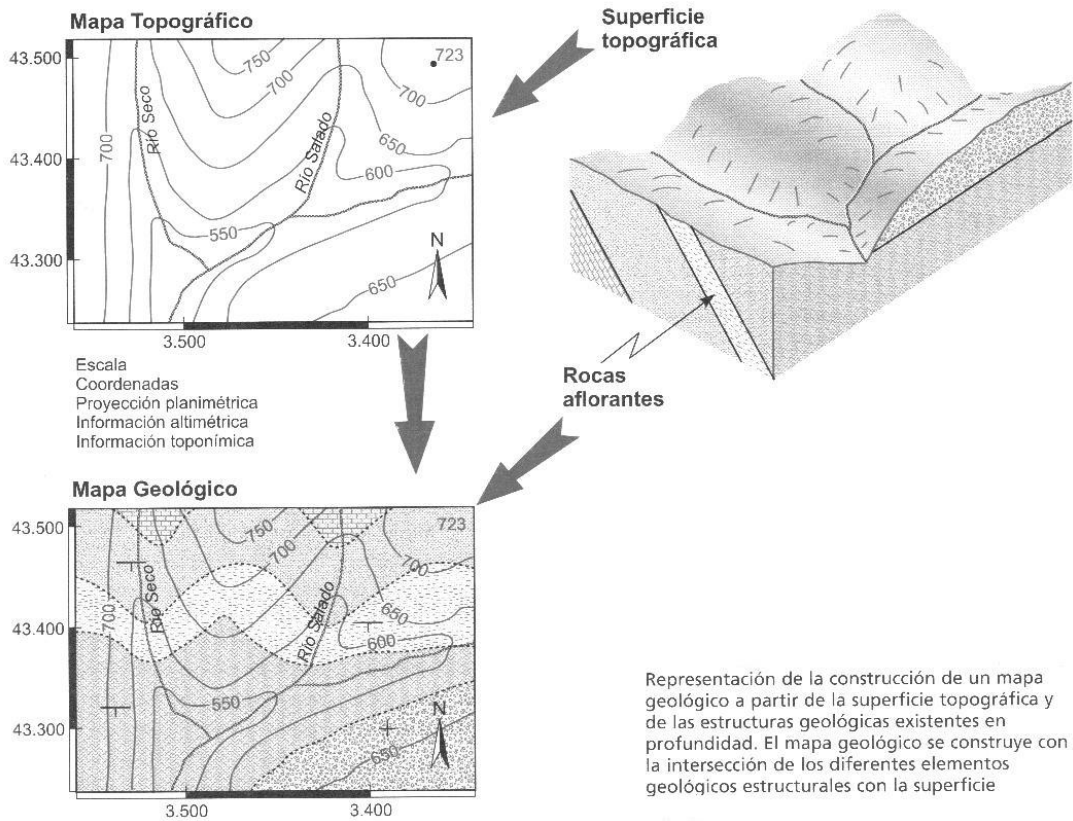


Figura 4-1. Representación geológica.

La información geológica presente en un mapa debe permitir interpretar la estructura geológica en el espacio (cortes geológicos) y en el tiempo (reconstrucción de la historia geológica). Para obtener esto un mapa geológico debe incluir tres tipos de elementos: litología, edad y estructura.

Adicionalmente un mapa geológico presenta una columna cronoestratigráfica en la que se representan las litologías, edades y relaciones de yacencia de cada una de las unidades estratigráficas definidas. Finalmente el mapa geológico va

acompañado de una serie de cortes geológicos que permiten interpretar la estructura de forma rápida.

Representación de la litología

Las capas o estratos en un mapa geológico aparecen representados como superficies. Para representar las diferentes litologías se suelen rellenar esas superficies con tramas. Aunque existe una serie de litologías que siempre se representan con la misma trama, estas tramas pueden variar de un mapa a otro, por lo que su descripción debe aparecer en la leyenda, Figura 4-2. Se suelen utilizar combinación de colores que determinan las edades.

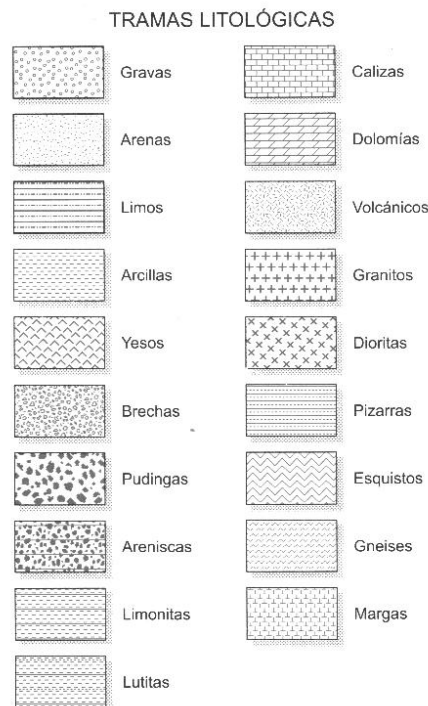


Figura 4-2. Tramas más comunes utilizadas en la representación geológica.

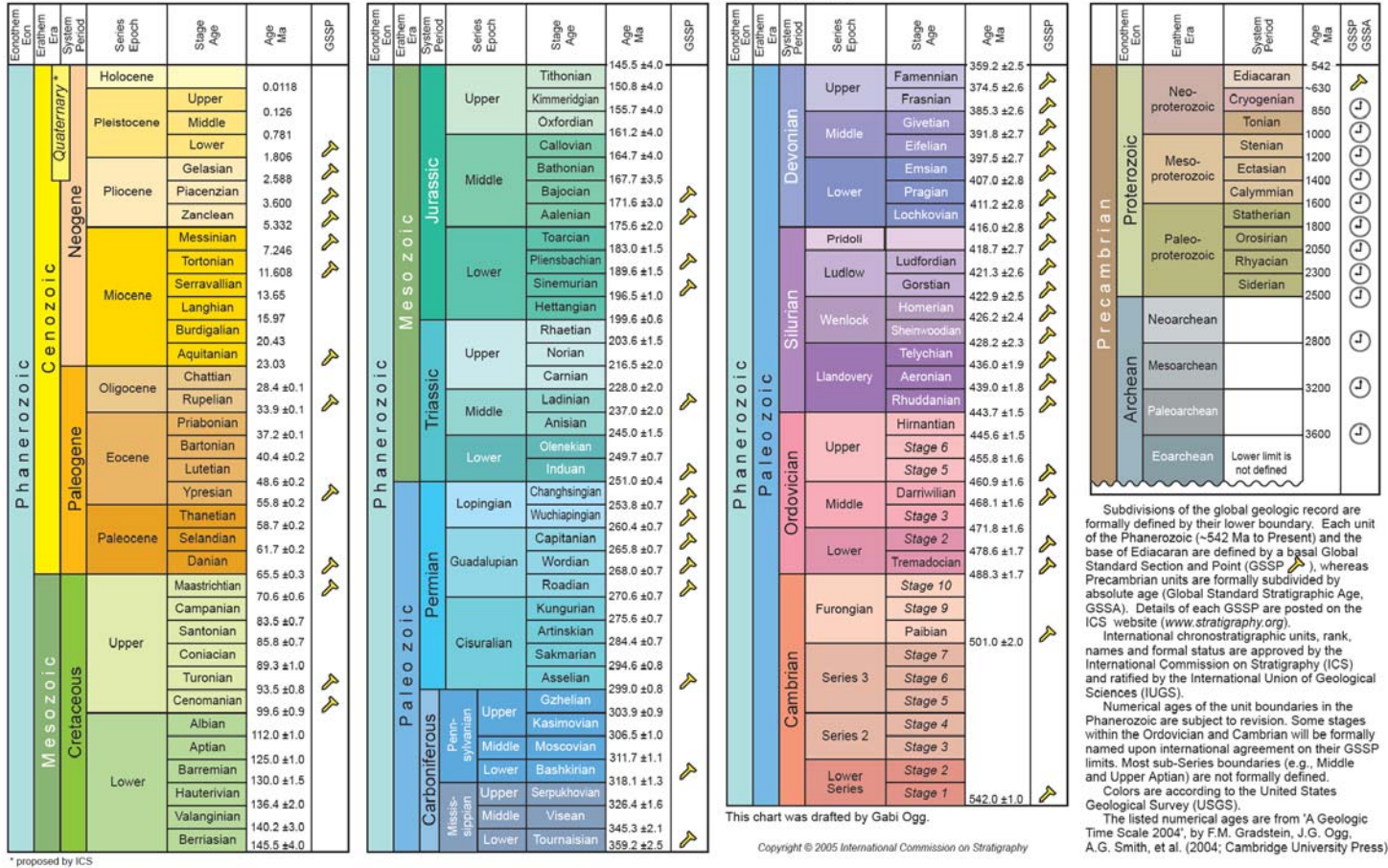
Representación de la edad

Las edades de los materiales se representan mediante diferentes tonos de colores. Existe un cierto acuerdo para usar una serie de colores específicos que hacen referencia a los diferentes periodos geológicos, Figura 4-3.



INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC CHART

International Commission on Stratigraphy



Subdivisions of the global geologic record are formally defined by their lower boundary. Each unit of the Phanerozoic (~542 Ma to Present) and the base of Ediacaran are defined by a basal Global Standard Section and Point (GSSP), whereas Precambrian units are formally subdivided by absolute age (Global Standard Stratigraphic Age, GSSA). Details of each GSSP are posted on the ICS website (www.stratigraphy.org).

International chronostratigraphic units, rank, names and formal status are approved by the International Commission on Stratigraphy (ICS) and ratified by the International Union of Geological Sciences (IUGS).

Numerical ages of the unit boundaries in the Phanerozoic are subject to revision. Some stages within the Ordovician and Cambrian will be formally named upon international agreement on their GSSP limits. Most sub-Series boundaries (e.g., Middle and Upper Aptian) are not formally defined.

Colors are according to the United States Geological Survey (USGS).

The listed numerical ages are from 'A Geologic Time Scale 2004', by F.M. Gradstein, J.G. Ogg, A.G. Smith, et al. (2004; Cambridge University Press).

Figura 4-3. Carta estratigráfica.

Para distinguir intervalos de tiempo distintos dentro de cada sistema, se suelen utilizar tonos del mismo color. Por ejemplo, para representar materiales cuaternarios se emplean tonos grises, amarillos para materiales neógenos, naranjas para los materiales paleógenos, verdes para los cretácicos, azules para los jurásicos, morados para los triásicos, etc. La utilización de estas gamas de colores permite una rápida interpretación de los mapas.

Representación de los elementos estructurales y geométricos

Cualquier elemento geométrico que se quiera representar debe estar referido con respecto al norte geográfico (dirección, δ) y al plano horizontal (buzamiento, β).

La dirección o rumbo de un plano estructural (δ), se puede definir como el ángulo que forma, con el norte geográfico, la intersección del plano estructural con un plano horizontal, Figura 4-4.

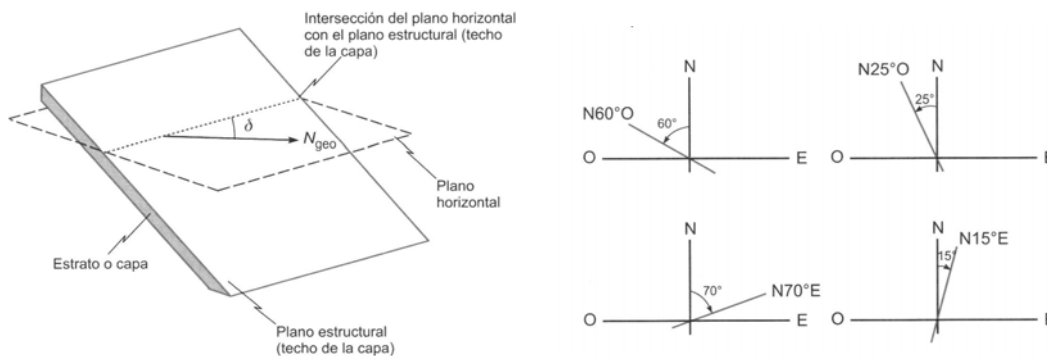


Figura 4-4. Dirección de un plano y su notación en mapas geológicos.

El buzamiento de un plano (β) se puede definir como el ángulo que forma la línea de máxima pendiente contenida en dicho plano con respecto a la horizontal. La línea de máxima pendiente en un plano es siempre normal a la dirección del plano. Para determina correctamente el buzamiento se debe determinar en que dirección se inclina el plano (dirección de buzamiento), Figura 4-5.

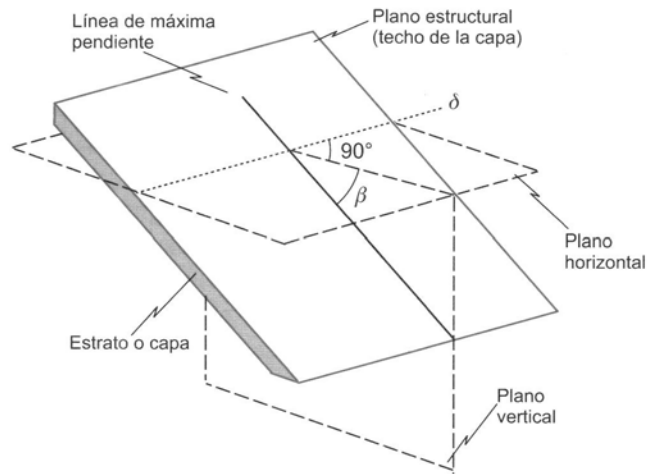


Figura 4-5. Buzamiento de un plano.

La dirección de buzamiento ($S\beta$) de un plano es el ángulo que forma la proyección de la línea de máxima pendiente en un plano horizontal con el norte geográfico. La dirección de buzamiento siempre es perpendicular a la dirección del plano, Figura 4-6.

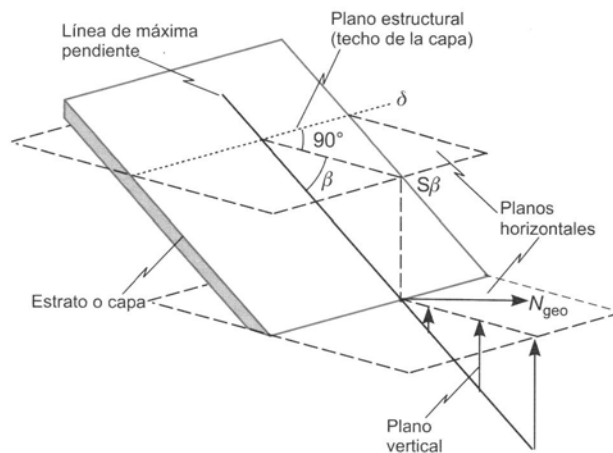


Figura 4-6. Determinación del sentido de buzamiento de un plano.

En el caso de una línea, tal como el eje de un sinclinal, su dirección y buzamiento se definen de manera análoga a la dirección de buzamiento y buzamiento de un plano y se denominan dirección de inmersión e inmersión de la línea.

Dirección de inmersión de una línea (SI) es el ángulo que forma, con respecto al norte, el plano vertical que contiene a esa línea.

La inmersión de una línea es el ángulo que forma una línea con un plano horizontal medido sobre un plano vertical que contenga esa línea.

Para representar la orientación y estructura de los materiales geológicos se utiliza una serie de símbolos que permiten caracterizar estructuralmente los materiales geológicos y definir las relaciones existentes entre ellos.

Los elementos que se suelen representar en un mapa geológico son:

- Contactos geológicos
- Orientación de los materiales (dirección y buzamiento)
- Pliegues
- Fallas

Contactos litológicos

Generalmente se pueden establecer tres tipos diferentes de contactos entre materiales: contactos concordantes, discordantes y mecanizados. Los dos primeros términos hacen referencia bien a las relaciones geométricas (paralelismo) que existen entre los planos de estratificación de dos materiales, es decir si son subparalelos o no lo son; o bien a la diferencia de edad entre los materiales que estén en contacto.

Los contactos concordantes definen un contacto entre materiales que además de presentar los planos de estratificación paralelos, no se puede definir una diferencia de edad sustancial entre ellos; es decir podemos considerar que, a escala geológica, la sedimentación ha sido continua a lo largo del tiempo. Por lo tanto podemos considerar que dos materiales separados por un contacto concordante presentan los mismos valores de orientación, Figura 4-7.

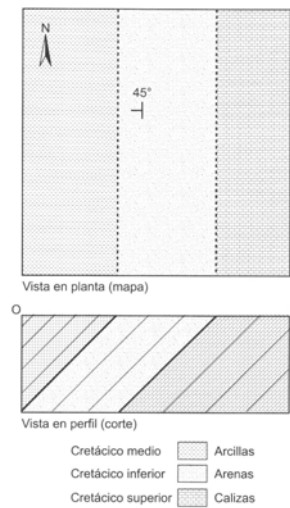


Figura 4-7. Representación de un contacto concordante.

Los contactos discordantes entre dos materiales, son aquellos en los que, o bien no existe paralelismo entre los planos de estratificación de esos materiales, o bien existe una diferencia importante de edad entre los mismos, es decir podemos considerar que la serie geológica definida por esos materiales no está completa, Figura 4-8.

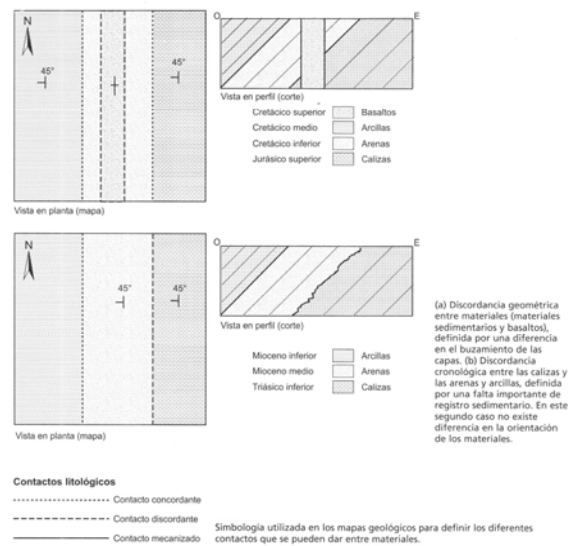


Figura 4-8. Representación de un contacto discordante.

Los contactos mecanizados son todos aquellos que ponen en contacto dos materiales por medio de una falla o sistema de fallas.

Para representar en los mapas geológicos las características de los contactos entre materiales se utilizan diferentes tipos de línea: los contactos concordantes se representan por líneas punteadas, los contactos discordantes se representan por líneas discontinuas; y los contactos mecanizados se representan por líneas continuas y en general de trazo más grueso.

Orientación de los materiales

La estratificación de un material es el plano o conjunto de planos paralelos que limita o estructura internamente una capa, y que generalmente se encontraba en posición horizontal en el momento de la sedimentación del material. Los planos de estratificación se pueden definir únicamente en materiales sedimentarios, y en algunos casos, en materiales metamórficos.

Se denomina muro o base de una capa el límite inferior de la capa, es decir a la parte inferior de la capa cuando se depositó, siendo el techo el límite superior de la capa. Un estrato está en posición normal cuando al trazar una línea vertical sobre la capa se corta antes el techo que el muro de la capa. Una capa está en posición invertida cuando al trazar una línea vertical cortamos antes la base de la capa que el techo. En este caso se dice que el material presenta un buzamiento invertido. La simbología para representar la orientación de las capas de muestra en las Figuras 4-9 a 4-11.

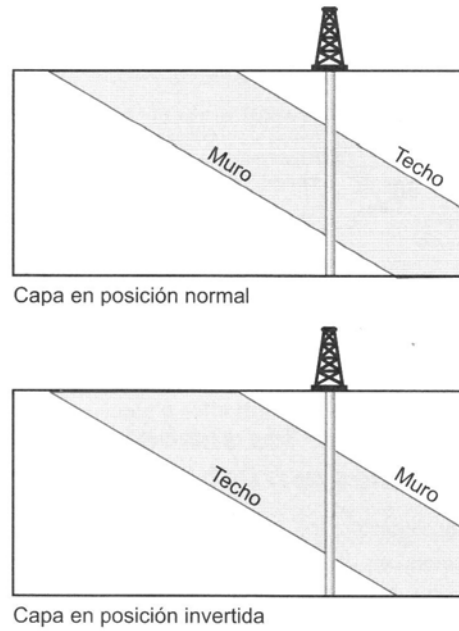


Figura 4-9. Esquemas de la posición de la base y el techo de un estrato en condición normal e invertida.

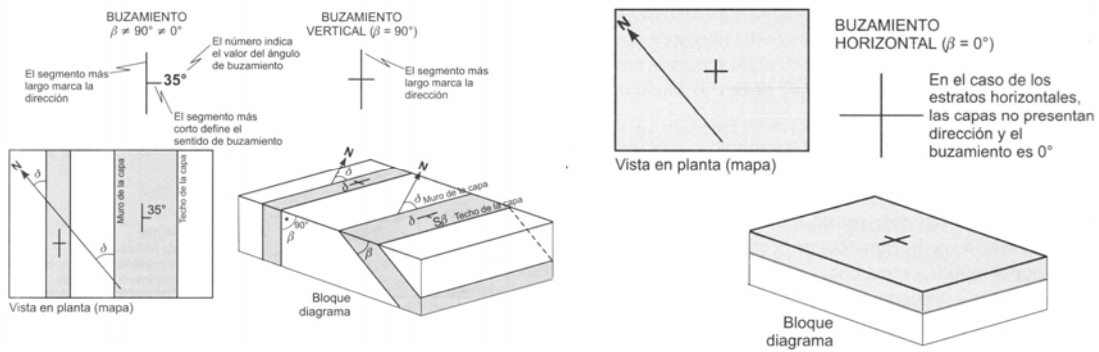


Figura 4-10. Representación del buzamiento de un estrato normal.

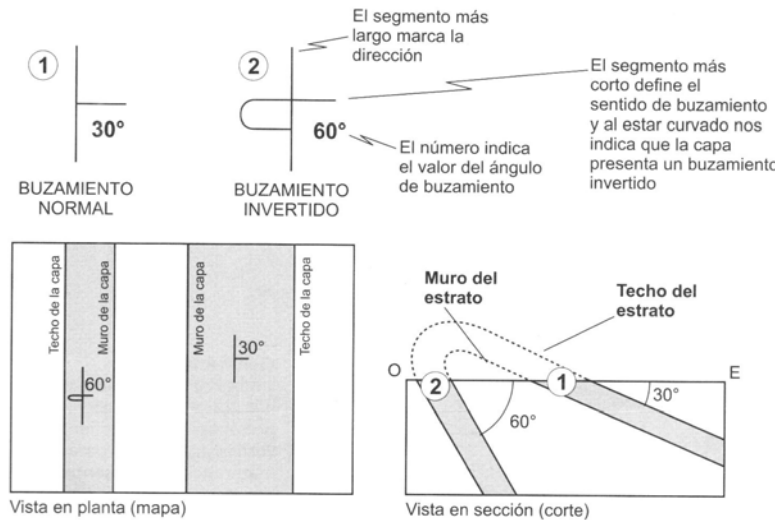


Figura 4-11. Representación del buzamiento de un estrato invertido.

En materiales metamórficos además de los datos de buzamiento de los materiales en el caso de que se preserven, también se suelen representar los planos de foliación de estas rocas. La orientación de los planos de foliación o esquistocidad se representa de manera análoga a la estratificación, pero para representar el sentido de buzamiento de la esquistocidad se suele utilizar un triángulo en lugar de un segmento, el vértice del triángulo indica el sentido de buzamiento de los planos de foliación. En el caso de esquistocidad vertical se incluyen dos triángulos opuestos en sus bases, Figura 4-12

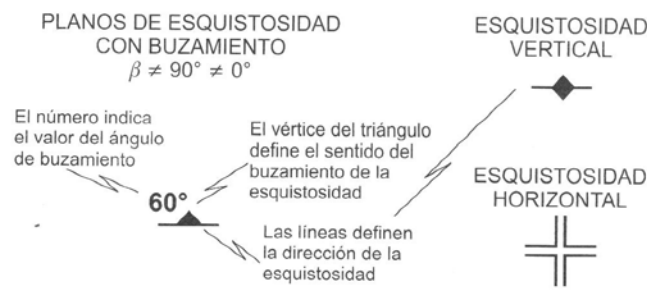


Figura 4-12. Representación del buzamiento de la foliación en rocas metamórficas.

Pliegues

Un pliegue es el resultado de la deformación de un volumen de roca en el que no se produce la rotura o fractura de la roca, sino que se produce el plegamiento del material.

El eje de un pliegue es la línea que une los puntos de máxima curvatura. Los flancos del pliegue son las porciones del pliegue situadas entre los ejes. Plano axial es la superficie que contiene todos los ejes. La vergencia de un pliegue es el sentido de la dirección opuesta al sentido de buzamiento del plano axial de un pliegue, Figura 4-13.

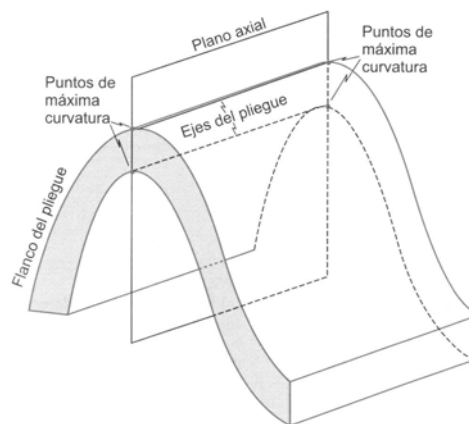


Figura 4-13. Esquema de los principales elementos de un pliegue.

Los pliegues se representan mediante una línea que representa la proyección en la superficie topográfica del eje del pliegue, y unos símbolos (usualmente flechas) que indican hacia donde buzaban los estratos de cada uno de los flancos del pliegue, definiendo de esta forma el tipo de pliegue: sinclinal o anticlinal.

Si es un pliegue anticlinal las flechas divergen desde la traza de la línea axial; por el contrario, si el pliegue es un sinclinal las flechas convergen en un punto central. Las flechas señalan hacia donde buzaban los flancos de la estructura plegada, Figura 4-14.

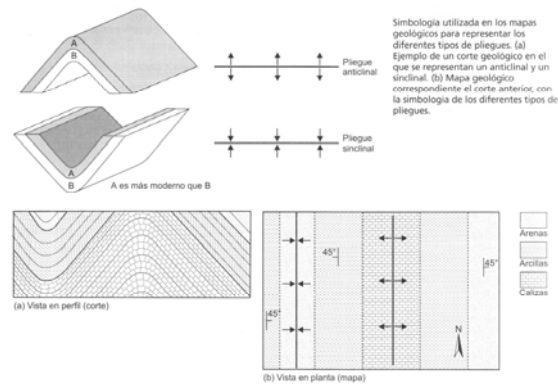


Figura 4-14. Representación de pliegues en mapas geológicos.

En el caso en que los estratos que conforman uno de los flancos del pliegue estén en posición invertida en vez de normal, la simbología cambia, Figura 4-15.

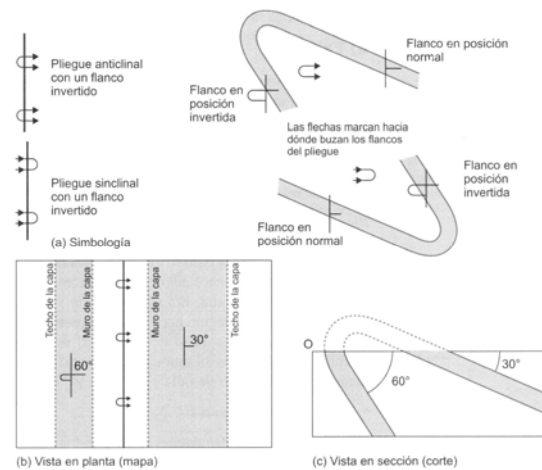


Figura 4-15. Representación de pliegues con flancos invertidos.

De esta forma podemos diferenciar estructuras plegadas anticlinales con flanco invertido y estructuras plegadas sinclinales con flanco invertido. En ambos casos los estratos que definen los flancos de los pliegues buzan en el mismo sentido, uno de ellos en posición normal y otro en posición invertida.

Fallas

Las fallas junto con los pliegues son los elementos que comúnmente aparecen en los mapas geológicos. Una falla representa un plano por el que se ha fracturado un volumen de roca y sobre el cual se deslizan los bloques definidos por la fractura.

Plano de falla es la superficie de rotura a través de la que se produce el deslizamiento de los volúmenes de roca afectados. Bloque de una falla serían cada uno de los dos volúmenes de roca que quedan separados por el plano de falla. Bloque colgante o elevado y bloque yacente o hundido son los nombres dados a los dos bloques y se definen en función del movimiento relativo de ellos con respecto al plano de falla. Salto de una falla es el desplazamiento de uno de los bloques con respecto al otro medido sobre el plano de falla, Figura 4-16.

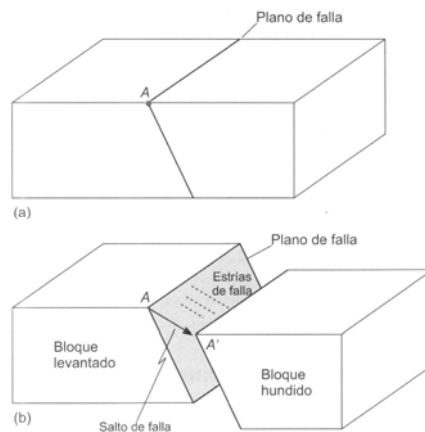


Figura 4-16. Elementos principales de una falla geológica.

Existen tres tipos fundamentales de falla en función del tipo de movimiento que se produce: movimientos en la vertical (fallas normales e inversas) y movimientos en la horizontal (fallas de rumbo). Falla normal es aquella en la que el bloque yacente se apoya sobre el plano de falla. Falla inversa es aquella en que el bloque colgante es que está apoyado sobre el plano de falla. En la falla de rumbo el desplazamiento de los bloques es horizontal a lo largo del plano de falla.

Las fallas se pueden representar simplemente como un contacto mecanizado. Aunque cuando sea posible es debe añadir otra simbología que indique el tipo de falla. Si la falla es normal, al símbolo de contacto se le añaden segmentos perpendiculares de menor tamaño, que señalan el bloque yacente. Si la falla es inversa, se le añaden unos pequeños triángulos, cuyos vértices señalan el bloque colgante. Si una falla es rumbo, se añaden al símbolo del contacto unas flechas que indican el sentido de movimiento, Figura 4-17.

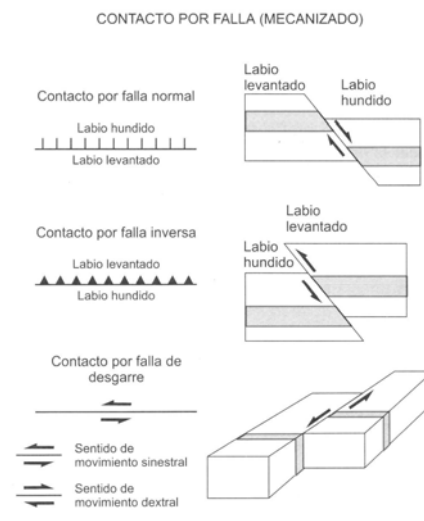


Figura 4-17. Representación de los diferentes tipos de falla.

En la naturaleza generalmente se presentan fallas de carácter mixto. Esto es que presentan movimientos tanto en la horizontal como en la vertical. Dependiendo del porcentaje de movimiento con respecto a cada orientación se definen los nombres.

La traza de los diferentes elementos geológicos en su superficie está condicionada por la topografía. Dependiendo de la superficie topográfica sobre la que aflora, la traza de la capa puede presentar trazas rectas o curvas como se observa en las Figuras 4-18. y 4-19.

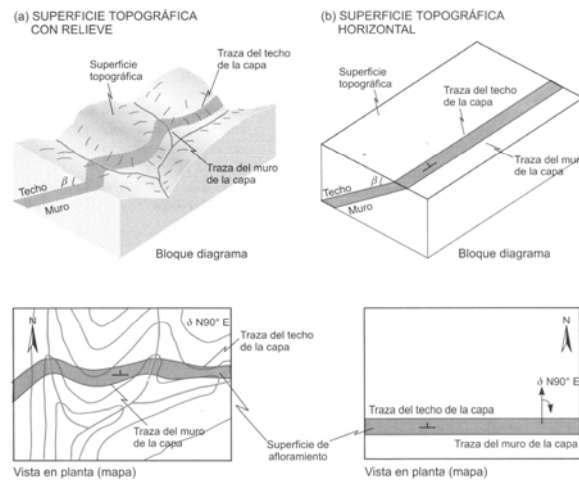


Figura 4-18. Representación de afloramientos de estratos de roca del mismo espesor pero en topografía diferente.

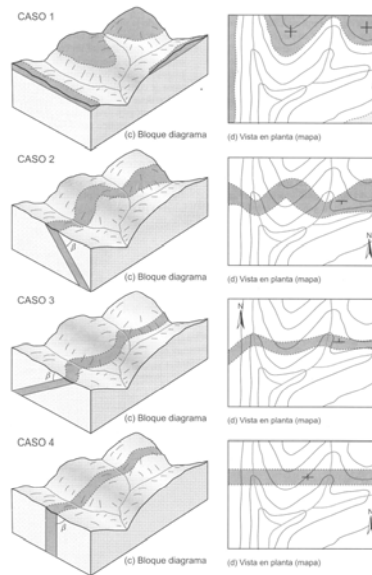


Figura 4-19. Esquema de representación de estratos de roca con igual topografía y espesor pero diferente buzamiento.

La superficie de afloramiento de una capa en una superficie topográfica depende de la forma topográfica y del espesor y buzamiento de la capa como se observa en las Figuras 4-20 y 4-21.

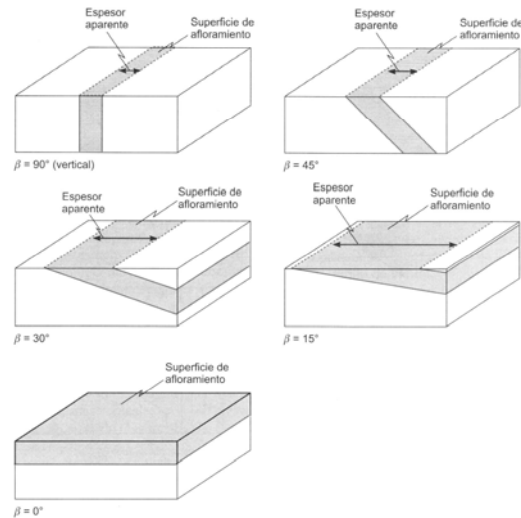


Figura 4-20. Variaciones en la superficie de afloramiento de una capa con diferentes valores de buzamiento en una zona de topografía plana.

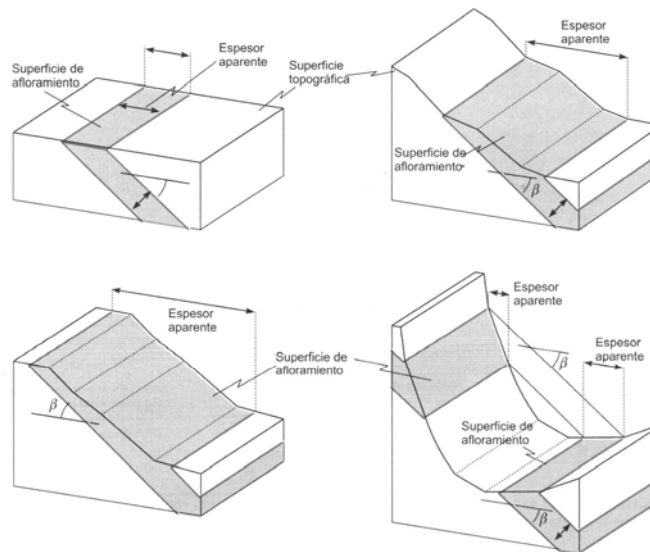


Figura 4-21. Variación en la superficie de afloramiento de una capa con el mismo valor de buzamiento pero en diferentes superficies topográficas.

4.2 Geomorfología

La geomorfología estudia las formas de la superficie terrestre en relación con su origen y los procesos que lo han transformado. Existen varias definiciones de geomorfología que han sido referenciadas por Villota (1991), las cuales concluye que la geomorfología tiene como objeto:

- La descripción de las formas del terreno.
- La explicación de su génesis, o sea su origen y evolución a través del tiempo geológico.
- La definición de la naturaleza de los materiales que constituyen las geoformas.
- La clasificación del paisaje, particularmente con base en su morfología, origen, edad y composición.
- La explicación y descripción de los agentes y procesos geomorfológicos generadores.

Villota (1991) asume la definición de Bloom, quien dice que el **paisaje terrestre** está hecho de rocas, construido por las fuerzas internas de la tierra, que han actuado a través del tiempo geológico, en presencia de vida. Un paisaje que ha evolucionado como resultado de la reacción de las rocas a la evolución atmosférica y a la fuerza del agua corriente, bajo un baño de energía solar; evolución que se manifiesta a través de procesos de degradación y acumulación o sedimentación.

Con base en esta definición se establecen los elementos necesarios para describir el paisaje terrestre, a saber:

1. Las rocas en la corteza terrestre, las cuales según su génesis son ígneas, metamórficas y sedimentarias, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con los procesos que las generaron.
2. Las fuerzas internas y relieves iniciales, dentro de los procesos que generan fuerzas internas se incluye la orogénesis, la tectónica de placas, la expansión del fondo del océano, el volcanismo, los sismos y el metamorfismo. Las formas iniciales están dadas por las deformaciones de la roca como producto de las fuerzas internas, entre estas deformaciones se incluyen los plegamientos y fracturas (fallas, juntas, diaclasas, etc.)

Dentro del ciclo orogénico el periodo de deformación inicial viene acompañado de un periodo de degradación, durante el cual los relieves iniciales evolucionan de manera lenta pero continua, como consecuencia de la acción de diversas fuerzas naturales que utilizan tanto la energía solar como el calor del interior de la tierra.

La principal fuerza de cambio, dice Villota, es la radiación solar, la cual es responsable de acciones como el calentamiento de la superficie de océanos y continentes, que acompañado de la rotación de la Tierra genera los vientos; el ciclo hidrológico incluyendo procesos como la precipitación, evapotranspiración, absorción por parte de las plantas, etc.; calentamiento de las rocas superficiales durante el día y enfriamiento durante la noche generando procesos de expansión y contracción, y finalmente la aceleración de reacciones químicas induciendo la meteorización. Entre las fuerzas de cambio, Villota también incluye la atracción gravitacional del sol y la luna, responsables de las mareas; la gravedad terrestre, responsable de las fuerzas inestabilizadoras; el calor interno de la Tierra como agente modificador del relieve y los movimientos sísmicos.

Las diferentes fuerzas de cambio pueden desprender, transportar y depositar los productos de alteración de las rocas, convirtiéndose en los agentes de cambio, a los cuales se les puede asociar diferentes procesos de degradación como lo muestra la Tabla 4-1.

FUERZA O AGENTE	PROCESO GEOMORFOLÓGICO	
	DENUDATIVO DENUDACIONAL	CONSTRUCTIVO AGRADACIONAL
Agua, hielo, temperatura, organismo	Meteorización de las rocas	Principio de formación de suelos
Gravedad, movimientos sísmicos	Remoción en masa	Sedimentación coluvial
Lluvia	Erosión fluvial	Sedimentación coluvial y sedimentación diluvial
Esorrentía	Erosión fluvial	Sedimentación aluvial
Oleaje, corrientes costeras, mareas	Erosión marina o lacustre	Sedimentación marina o lacustre
Nieve y hielo en movimiento (glacial)	Erosión glacial	Sedimentación glacial
Viento	Erosión eólica	Sedimentación eólica
Hombre	Erosión antrópica	Acción antrópica positiva

Tabla 4-1. Agentes y procesos geomorfológicos. (Tomado de Villota, 1991)

4.2.1 Geomorfología como ciencia

La geomorfología se especializa en estructural (que atiende a la arquitectura geológica) y climática (que se interesa por el modelado), incorpora las técnicas estadísticas sedimentológicas, en laboratorio y, sobre todo, pierde su aislamiento para convertirse en una ciencia que atiende múltiples factores e inserta el estudio del relieve al conjunto de relaciones naturales que explica globalmente la geografía física.

Conexión con geología, climatología, hidrología y biogeografía

La geomorfología tiene que contar prioritariamente con el factor geológico que explica la disposición de los materiales. Las estructuras derivadas de la tectónica y de la litología configuran frecuentemente los volúmenes del relieve de un modo más o menos directo.

El clima introduce modalidades en la erosión y en el tipo de formaciones vegetales, de modo que la morfogénesis adquiere características propias en cada zona climática. La elaboración de geoformas también depende de los paleoclimas que se han sucedido en un determinado lugar.

De las condiciones climáticas, biogeográficas, topográficas y litológicas, depende la eficacia erosiva de los cursos de agua y de otros modos de escorrentía. Aquí habrá que considerar el conjunto de la red hidrográfica.

La cobertura vegetal introduce un tapiz protector en la interfase atmósfera-litósfera, razón por la cual la biogeografía da claves importantes en el análisis de las geoformas y de los procesos que las modelan. Pero esta cobertura no depende sólo del clima y del sustrato rocoso, sino también de la acción antrópica.

- ✓ **Geoforma:** Una geoforma es un cuerpo tridimensional: tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve. Se han clasificado treinta y seis (36) geoformas; el primer paso es identificar las geoformas con su topografía, drenaje, textura, tono, vegetación natural y uso del suelo.

Una geoforma está compuesta por materiales que le son característicos: como arenas, gravas, arcilla o cuerpos masivos; tiene una génesis y por lo tanto una dinámica que explica los materiales que la forman.

Como geoformas las rocas son lechos rocosos; los deltas, abanicos, terrazas y llanuras de inundación, son materiales transportados. Los suelos residuales están asociados a los lechos rocosos.

Utilizando imágenes se puede inferir que el tono y la textura dependen de la vegetación, que el uso del suelo permite hacer asociaciones con aptitudes, que las formas de erosión anuncian si el material es arenoso o rocoso. La topografía a su vez, está relacionada con la pendiente, y puede ser: plana, ondulada, quebrada o escarpada; donde existen entrantes o salientes del terreno son factibles los cambios litológicos.

- ✓ **El drenaje** está caracterizado por una forma o patrón modelo, donde el índice de erosión o remoción es muy importante y la textura es el grado de espaciamiento entre los canales del drenaje. La textura en rocas puede ser gruesa, media o fina, y la erosión, laminar, por surcos o por cargas.
- ✓ **La vegetación** puede ser natural y su altura anuncia la profundidad del suelo, cuando hay densidad. Las variaciones en la densidad de la vegetación se asocian con presencia de aguas subterráneas. Si es artificial se considera ya un uso del suelo. En un abanico aluvial los bosques de galería anuncian el drenaje y la vegetación es más alta en su pie que en el ápice a causa del nivel freático.

A continuación se presenta la Tabla 4-2 donde se encuentran de claves fotogeológicas para la identificación de las diferentes rocas y fallas, de acuerdo a tres aspectos fundamentales: tonos, texturas y drenaje.

Conceptos básicos de geomorfología

1. Los procesos físicos de hoy operaron en el pasado geológico.
2. La estructura geológica condiciona las formas del relieve.
3. El proceso geológico se expresa en la geoforma.
4. Cuando los diferentes agentes modelan la corteza se produce la secuencia que evidencia tales etapas.
5. La complejidad es más común que la simplicidad en las geoformas.
6. La geología del cuaternario domina la topografía.

7. La adecuada interpretación del paisaje exige conocer los cambios geológicos y climáticos pasados.
8. La presión y temperatura del clima regional son necesarias para entender los procesos geológicos.
9. Se debe mirar la geomorfología de hoy en el contexto de las geoformas pasadas.

Claves de fotointerpretación

Se mostrará en la Tabla 4-2 las claves fotogeológicas atendiendo como aspectos relevantes, tonos, texturas y drenajes, tanto de las rocas como de las estructuras geológicas.

ASPECTOS	ROCAS INTRUSIVAS	ROCAS VOLCANICAS	ROCAS CLASTICAS
TONOS	- Claros salvo humedad (gris) - Oscuros en ultramáficas - Claros a oscuros en hipoabisales y diques	- Oscuro en las jóvenes, en las meteorizadas es claro. - Claros en conos de ceniza y lavas viejas, secas y sin cobertura	- Claros en conglomerados, areniscas maduras y lodolitas de desiertos. - Oscuro en areniscas maduras y lodolitas, por humedad. - Oscuros en estructuras
TEXTURAS	- Homogéneas masiva	-Finas en tefras (tobas, cenizas). - Rugosas en lavas, flujos o bloques	- Gruesas en conglomerados y areniscas. - Finas en lodolitas (dan flatiron)
DRENAJE	- Dendrítico, pinzado o radial y puede variar con el diaclasamiento y la composición - Radial-anular en hipoabisales	- Paralelo en basaltos. - Dendrítico en tobas y depósitos piroclásticos - Anular en domos. - Radial en volcanes - Anómalo en lagunas y canales discordantes	- Rectangular, paralelo y subparalelo en conglomerados y areniscas maduras - Subparalelo y subdendrítico en areniscas inmaduras - Subparalelo a dendríticas en lodolitas

Tabla 4-2. Claves fotogeológicas (1)

ASPECTOS	ROCAS NO CLASTICAS	ROCAS METAMORFICAS	FALLAS
TONOS	- Claros casi siempre - Oscuros si hay materia orgánica o humedad, bandeados si hay interstratificación	- Oscuros generalmente pero no intensos - Claros en cuarcita - Claros a semioscuros en gneises	Cambios bruscos y oscuros por agua o claros si hay exceso de drenaje
TEXTURAS	El del relieve (ejemplo paisaje cárstico). No da flatiron	- Finas pizarras - Medias a gruesas, gneises. - Esquistosidad	Cambios, anomalías e irregularidades
DRENAJE	- Discontinuo y con sumideros en karst. - Controlado por fracturas subterráneas	- Dendrítico a rectangular en pizarras y filitas. - Variable en esquistos - Colector con poco drenaje secundario en cuarcitas - Dendrítico a rectangular en gneis	- Desviación sistemática - Controles anómalos. - Alineado y con dirección perpendicular

Tabla 4-3. Claves fotogeológicas (2)

Claves de fotointerpretación de rocas plutónicas

1. Los contactos de intrusiones graníticas con rocas encajantes son discordantes, nítidos y sencillos.
2. Los cuerpos graníticos tienen grandes dimensiones.
3. Los tonos son claros (buena reflectancia), salvo en condiciones de humedad.
4. La textura es homogénea, pues su aspecto es masivo.
5. El drenaje es normalmente dendrítico-pinzado o radial, en caso de domos.
6. Si hay muchas diaclasas el patrón es rectangular.
7. El tono y drenaje puede variar con la composición, densidad de diaclasas y humedad.
8. La topografía se presenta en cerros con forma de A o macizos redondeados.
9. Presentan más fracturamiento cuando tienen mayor antigüedad.
10. En el trópico desarrollan saprolito profundo.

Claves de fotointerpretación de rocas volcánicas

1. Son reconocibles si no están erosionadas.
2. Las geoformas dependen del tipo de lava y su actividad.
3. Los basaltos presentan columnas, drenaje paralelo grueso y suave topografía.
4. Los cráteres de ceniza son claros y con pendientes altas (ángulo de fricción $f = 35^\circ$).
5. Las lavas viscosas son lenguas de pared abrupta y tienen formas en pata de elefante.
6. Los depósitos lávicos forman colinas de cresta aguda.
7. Muy disectadas por drenaje dendrítico y fino cuando son recientes, además presentan tonos claros y laderas verticales y uniformes.
8. Presentan tonos oscuros en lavas jóvenes, aunque la vegetación las aclara algo.
9. Los patrones de drenaje son dendríticos en depósitos piroclásticos y tobas; anular, en edificios volcánicos; radial, en la base de los volcanes, anómalo con lagunas y canales discontinuos, en los flujos.
10. La vegetación es escasa si el material es reciente, y la porosidad y permeabilidad son altas, aunque disminuyen con la meteorización.

Claves de fotointerpretación de rocas sedimentarias clásticas

1. Estas rocas son las que más información arrojan.
2. Las rocas sedimentarias forman estructuras secundarias (pliegues, fallas, diaclasas) que se evidencian por alineamientos de cualquier tipo (tonos más oscuros, drenajes controlados, cordones vegetales).
3. Las geoformas que más las delatan son los flatirón (planchas), que se desarrollan sobre las rocas sedimentarias duras (areniscas compactas) y son las geoformas fruto de la erosión diferencial.

4. Generalmente la pendiente topográfica corresponde a la pendiente estructural que es larga y suave.
5. En la contrapendiente hay escalonamientos por el contraste entre estratos duros y blandos que se alternan.
6. Los conglomerados muestran tono claro a medio; textura gruesa; a muy gruesa, drenaje rectangular, subparalelo o paralelo; vegetación escasa y arbustiva; escarpes verticales en la contrapendiente, y crestas agudas rectilíneas y de gran continuidad.
7. Las areniscas pueden ser maduras o inmaduras; las intermedias tienen rasgos que oscilan entre los extremos de estas.
8. Las areniscas maduras muestran tono claro a medio, textura gruesa a media, drenaje rectangular a subparalelo, canales en V cerrada, vegetación escasa a media, escarpes escalonados y excelentes niveles guías.
9. Las areniscas inmaduras son oscuras y de textura gruesa, drenaje subparalelo o subdendrítico, vegetación buena a excelente y morfología ligeramente escarpada a suave en la contrapendiente estructural y ondulada en la pendiente.
10. Las lodolitas son de tono oscuro en clima húmedo y claro en desiertos, textura fina, drenaje dendrítico o subparalelo y vegetación exuberante si el clima es húmedo, morfología deprimida con desarrollo lineal extenso, excelente contraste con unidades duras y malos niveles guías.

Claves de las rocas sedimentarias químicas

1. No dan flatiron (estratos en altorelieve triangular sobre la pendiente) y muestran fracturas bien desarrolladas que controlan la vegetación y dolinas y sumideros cuando siendo carbonatadas resultan afectadas por la disolución.
2. Normalmente la vegetación es poca y alineada con las fracturas. En el trópico ésta puede ser densa.
3. El relieve es función del clima y de la composición de la caliza. Los tonos son claros.
4. En clima árido se presentan crestas empinadas y tonos claros, nunca oscuros.

5. En climas húmedos el paisaje es cárstico: bosques de mogotas o colinas puntiagudas. Además se desarrollan dolinas, poljes (depresiones cerradas) y sumideros.
6. El drenaje se pierde por los sumideros resultando interrumpido.
7. El relieve es más suave que en zonas áridas y entre más pura y cristalina sea la roca, más abrupto resulta el relieve.
8. Si se encuentra materia orgánica y humedad, los tonos son oscuros.

Claves de fotointerpretación de rocas metamórficas

1. Son las rocas más difíciles de identificar.
2. A mayor grado de metamorfismo, más desaparecen los rasgos litológicos y estructurales.
3. El metamorfismo iguala la resistencia de la roca, resultando una topografía más masiva.
4. La esquistosidad es el principal elemento de fotoidentificación; le da al paisaje una sensación de paralelismo (control de cárcavas, drenaje, etc.).
5. En rocas metasedimentarias se alcanza a insinuar la estratificación con algo de flatiron.
6. El tono es generalmente oscuro pero no intenso.
7. El drenaje tiende a ser uniforme y constante tendiendo a dendrítico o rectangular.
8. Cuando provienen de rocas ígneas, su aspecto es masivo y no presentan foliación.
9. Desarrollan relieve de cualquier tipo por lo que aquél no es guía.
10. Muestra colinas alineadas con crestas o cuchillas.
11. Las pizarras y filitas muestran textura fina, drenaje dendrítico rectangular, vegetación escasa (y a veces alineada), y no muestran estructuras falladas aunque conservan la estratificación de la roca madre. En la morfología se presentan crestas agudas y laderas empinadas no muy altas.

12. Los esquistos tienen clara orientación, buena foliación, tono gris uniforme (de medio a oscuro), drenaje variable, según el clima, pero controlado por la foliación, morfología con planos de esquistosidad planos y cóncavos paralelos.
13. Las cuarcitas dan tonos claros, crestas empinadas, drenajes colectores, poco drenaje secundario, crestas filudas, fracturas controlando el drenaje, los contactos con otras rocas tienen fuerte contraste y la vegetación es escasa, está alineada y es de tipo arbustivo.
14. Los gneises tienen aspecto masivo y muestran fracturas bien desarrolladas (fallas) que controlan el drenaje. Las lomas son alargadas con cimas suaves pero altas y pendientes. Su tono es claro a semioscuro y la textura rugosa.
15. El drenaje es dendrítico a rectangular con textura media a gruesa. Las lomas desprovistas de capa vegetal desarrollan poco suelo y poca vegetación dando posibilidad a la observación de los diques que las cortan.

Claves diagnósticas para caracterizar movimientos en masa

1. Características morfológicas. Pendientes cóncavas y convexas, nichos semicirculares, pendientes escalonadas, bloques inclinados, relieve irregular (hummocky), formación de grietas y cambio súbito de pendiente.
2. Características de la vegetación.> Vegetación desordenada y parcialmente muerta, cambios en la vegetación coincidentes con escalones morfológicos, zonas con vegetación menos abundante, (elongadas y claras), diferencia de vegetación dentro y fuera del deslizamiento y cambios de vegetación asociados a condiciones de drenaje.
3. Características del drenaje y medidas de estabilización. Drenaje desordenado con líneas interrumpidas, anomalías en los patrones de drenaje, zonas de acumulación de agua, zonas de infiltración o nacimientos (tonos oscuros), zonas excesivamente drenadas (tonos claros). Si hay intervención, canalización de aguas y terracetos.
4. Otras características o elementos. Ausencia de vegetación, escarpes en forma de pinza, concavidades elongadas, depósitos elongados, acumulaciones en quiebres de pendiente, facetas triangulares, cuerpos coalescentes (masas contiguas dislocadas), escarpes elongados y lóbulos de flujo.

Claves para identificación de rasgos estructurales

1. *Monoclinales*. En la cuesta (pendiente suave), el drenaje es dendrítico o paralelo, el suelo es grueso o potente, hay buen desarrollo de la vegetación y drenaje es poco denso. En la contrapendiente el drenaje es denso, subdendrítico, se presentan movimientos en masa y a veces la topografía es cóncava, el suelo es casi nulo y es notoria la poca acumulación de agua y poca la vegetación.
2. *Hogback y cuchillas estructurales*. El hogback es un bloque donde la pendiente y la contrapendiente tienen la misma inclinación. Uno de los estratos conforma en la pendiente una capa de cubierta dura que presenta erosión en cárcavas con pobre
3. *La cuchilla estructural* es una forma masiva que corresponde a un afloramiento de capas duras. La pendiente y la contrapendiente son simétricas y el drenaje por ambos lados es paralelo; las superficies muestran cárcavas y no se desarrolla suelo ni vegetación en ningún flanco.
4. *Pliegues*. Los anticlinales muestran drenaje radial poco denso (según la litología expuesta); si está erosionado, muestra el núcleo y la roca es estratificada, además hay poco suelo por la pendiente de la geoforma y poca agua, pues es mal acuífero. El sinclinal muestra drenaje centrípeto, núcleo deprimido, estratos que buzcan hacia el centro del pliegue y humedad y vegetación buena en su núcleo, pues se trata de un buen acuífero.
5. *Fracturas*. Las diaclasas muestran un drenaje cuya intensidad depende de la roca. En la diaclasa hay agua, vegetación y erosión. El suelo es profundo si la vegetación es intensa y la pendiente favorece su estabilidad.
6. *Las fallas* muestran fuerte meteorización y suelos pobres en los escarpes, aunque buenos en los pies. En el escarpe no hay vegetación pero sí en los bajos donde se almacena la humedad.

Los indicadores de las fallas son los desplazamientos de las capas horizontales o verticales, los cambios abruptos en el rumbo y buzamiento, los escarpes, facetas triangulares y cañones en V cerrada, los cambios bruscos de tono y vegetación, los tonos oscuros por agua y drenaje alineado, las desviaciones sistemáticas del drenaje, el diaclasamiento intenso o brechamiento y los movimientos en masa sistemáticos.

Geoformas

Con base en los conceptos anteriores Villota (1991) hace una clasificación de las geoformas más comunes, las cuales clasifica en dos grandes grupos, las degradacionales, las cuales asocia con paisajes de montaña, colinas y ondulaciones y las agradacionales, las cuales asocia con los procesos de sedimentación.

En la Tabla 4-4 se presentan las diferentes unidades de relieve de tipo degradacional, mientras que en la Tabla 4-5. se presentan las de tipo agradacional.

UNIDAD GENÉTICA DE RELIEVE	PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS	ROCAS AFECTADAS	TIPOS DE RELIEVE
Montañosos y colinoso estructural plegado	Plegamiento e inclinación o basculamiento	Sedimentarias consolidadas homogéneas y duras, cuarcitas.	Anticlinal, Anticlinal excavado, Cubeta sinclinal, Cresta monoclinal abrupta, Espinazo (Hog back), Cuesta
Montañosos volcánico y geoformas asociadas.	Volcanismo	Ígneas extrusivas; lavas, piroclásticas y flujos fragmentales	Estratovolcán, Volcanes basálticos en escudo, Volcanes de lavas ácidas, Conos de escorias, Coladas, campos y plataformas de lava, Campo de ignímbritas, Mantos de piroclastos
Montañosos y colinoso denudativo fluvio gravitacional	Erosión fluvial y remoción en masa	Ígneas intrusivas y metamórficas, algunas sedimentarias y volcánicas	Montañas y colinas
Montañoso denudativo glaciar y fluvio glaciar	Erosión glaciar y acción fluvial secundaria	Todo tipo de rocas en las cumbres de las montañas con altitud variable según latitud.	Circo, Artesa, Olla glaciar u ombligo, Conos de derrubios, Morrenas, Drumlins
Kárstico	Denudación química por disolución de carbonatos	Caliza, mármol, dolomita	Dolinas, Uvalas, Karst cónico, Poljes, Laberintos y torres karsticas, Valles secos y valles ciegos
Montañoso mixto (estructural-denudativo o volcano-denudativo o volcano glaciar	Combinación de los anteriores	Sedimentarias heterogéneas, duras y blandas o lavas, piroclásticas y flujos fragmentales	

Tabla 4-4. Sistemas montañosos y colinados (Según Villota, 1991).

PROCESO GEOMORFOLÓGICO	FUERZA O AGENTE	TIPOS DE RELIEVE
Sedimentación coluvial	Gravedad, lluvia, escurrimiento difuso	Cono de derrubios, cono de deslizamiento, coluvios de remoción, Glacis coluvial: valle estrecho coluvial,
Sedimentación diluvial	Gravedad y agua del suelo	Abánico o cono diluvia, coladas de lodo y de lahar, terrazas diluviales,
Sedimentación aluvial	Agua de escorrentía	Valle aluvial, llanura aluvial de piedemonte, cono de deyección, abánico aluvial, llanura aluvial de río trezado: barras de cauce, terrazas depositacionales, terrazas erosionales, llanura aluvial meándrica: plano inundable, barras de menadro, menadros abandonados, sobrevega, terrazas deposicionales; llanura aluvial de desborde, plano inundable, manto o napa de desborde, basín, brazos deltáicos y deltas de explayamiento, cauce abandonado, orillares, menadros abandonador, terrazas aluviales
Sedimentación litoral (costero marina, lacustre)	Corrientes de deriva litoral y corrientes de marea	Planicies deltáicas, playas marinas, barras de playa, cordones litorales, flechas o espigones, marismas o depósitos lagunares, planicies de mareas, terrazas marinas, edificaciones coralinas,
Sedimentación eólica	Viento	Dunas y médanos, dunas transversales, barjanes o barchanes, dunas parabólicas, dunas longitudinales, mantos de loess
Sedimentación glaciár	Glaciares	
Sedimentación mixta	Combinación de los anteriores	

Tabla 4-5. Sistemas agradacionales (Según Villota, 1991).

4.2.2 Mapeo geomorfológico

De acuerdo con Varnes (1974), la esencia del mapeo es la delimitación de áreas que son homogéneas o aceptablemente homogéneas para el objetivo que busca el mapa. El resultado debe consistir en dos parte: (1) que la representación bidimensional debe mostrar la distribución espacial de las áreas identificadas y (2) debe explicar en palabras y símbolos cuales son los atributos esenciales que diferencian las áreas delimitadas.

4.3 Hidráulica e hidrología

Siendo el objetivo principal de los análisis hidrológicos de la cuenca del río San Cristóbal, determinar caudales de creciente a partir de eventos de lluvia empleando un modelo lluvia escorrentía, se centran éstos análisis en tres aspectos importantes:

- Estimación de las características fisiográficas generales de la cuenca
- Análisis de los datos de precipitación
- Análisis de la infiltración en la cuenca

4.3.1 Características fisiográficas de la cuenca

Las características fisiográficas de la cuenca (área, perímetro, tiempos de concentración, etc.), son parámetros obtenidos a partir de la información cartográfica de la cuenca, y son los parámetros físicos que permiten conocer la reacción de la cuenca frente a eventos de lluvia extrema. A continuación se describen los parámetros más importantes que se tuvieron en cuenta en este análisis y que se ilustran en la Figura 4-22.

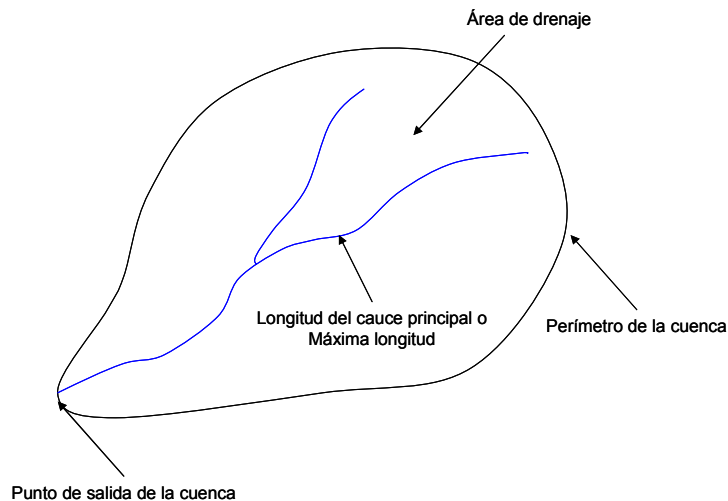


Figura 4-22. Características fisiográficas de la cuenca.

Área de drenaje

El área de drenaje es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas, siendo la divisoria una línea imaginaria que pasa por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de estudio de otras cuencas vecinas. Esta línea no siempre es el contorno real de la cuenca, ya que la influencia de la geología puede hacer que el contorno de aportación de aguas subterráneas y sub-superficiales sea distinto del superficial.

El área de la cuenca es importante debido a que generalmente, los caudales de escorrentía superficial, aumentan a medida que se aumenta la superficie de drenaje, además, mientras menor sea el área, es más común detectar eventos de creciente instantánea y de respuesta inmediata, a diferencia de una cuenca con un área mayor.

Perímetro de la cuenca

El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud del límite exterior de la misma o a la longitud de la línea imaginaria que divide el flujo en dos direcciones: hacia el interior de la cuenca, y hacia las cuencas adyacentes a la zona estudiada.

Elevación media

La variación en la altitud de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y de lluvias, y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats característicos de acuerdo a las condiciones locales. La elevación media es un parámetro que permite analizar la variación de la lluvia resultante en una región, siendo ésta una base para caracterizar zonas climatológicas en la cuenca.

Máxima longitud

Este parámetro corresponde a la longitud máxima medida por el cauce principal de cada cuenca, hasta el punto de salida o punto más bajo de la misma.

Pendiente media de la cuenca

La pendiente media constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce.

Otra forma de estimar la pendiente del cauce, es a través del método de Taylor, el cual relaciona la longitud del cauce principal con la diferencia de elevaciones entre el lugar de nacimiento del cauce y el punto final del mismo por tramos donde se conozca la diferencia de elevación. Tal pendiente, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$S_T = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n L_i / \sqrt{S_i}} \right]^2 \quad [4-1]$$

Donde:

S_T es la pendiente calculada por el método de Taylor, L es la longitud total del cauce, L_i la longitud de un tramo del cauce medida entre dos curvas de nivel a una altura determinada, y S_i la pendiente dada por la relación entre la diferencia de cota de dos curvas de nivel y la longitud L_i .

Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración se puede definir como el tiempo que tarda una gota de agua en llegar de las partes más alejadas de la cuenca hasta el sitio de interés. Este tiempo es un parámetro importante en los modelos lluvia - escorrentía, debido a que la duración de la tormenta se define con base en él. Esta duración crítica de la lluvia, debe asumirse igual al tiempo de concentración, puesto que para duraciones menores, no toda el área de la cuenca contribuye, y para duraciones más grandes, no hay incremento en el área contribuyente y la intensidad de la lluvia para una frecuencia dada, disminuye.

Este parámetro depende de variables morfométricas, como el área, la pendiente de la cuenca, la longitud del cauce principal, entre otros. En la literatura, existen diferentes maneras de definir el tiempo de concentración a partir de las variables morfométricas, y a partir de registros simultáneos de precipitación y caudal.

Otras definiciones para el tiempo de concentración, parten del tiempo de rezago de la cuenca, el cual se define como el tiempo entre el centro de gravedad del pluviograma de lluvia efectiva y el centro de gravedad de la hidrógrafa de escorrentía superficial directa.

Para determinar el tiempo de concentración, existen también numerosas expresiones desarrolladas para condiciones particulares en otros países; en este estudio, se emplearon las ecuaciones de Témez, Kirpich, Giandiotti, y Pérez; tales ecuaciones se explican a continuación.

Témez

$$tc = 0.3 \left(\frac{L}{So^{0.25}} \right)^{0.75} \quad [4-2]$$

Donde tc es el tiempo de concentración en horas, L la longitud del cauce principal en kilómetros, So la pendiente promedio (%) calculada a partir de la diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente dividida en la longitud L .

Kirpich

$$tc = 0.066 \left(\frac{L}{So^{0.50}} \right)^{0.77} \quad [4-3]$$

Donde L es la longitud del cauce principal en kilómetros, So la pendiente promedio (m/m) calculada a partir de la diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente dividida en la longitud L .

Giandioti

$$tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{L} So} \quad [4-4]$$

Donde A es el área de la cuenca en kilómetros cuadrados, L la longitud del cauce principal en kilómetros, So la pendiente promedio (m/m) calculada a partir de la diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente dividida en la longitud L .

Pérez

$$tc = \frac{L}{V_R} \quad [4-5]$$

Donde L es la longitud del cauce principal en kilómetros, y V_R es la velocidad por el cauce principal de la onda de creciente en kilómetros por hora, descrita por la ecuación:

$$V_R = 72 \left(\frac{\Delta E}{L} \right)^{0.6} \quad [4-6]$$

Siendo V_R la diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente.

4.3.2 Características hidrológicas de la cuenca

Análisis de los datos de precipitación

El análisis de los datos de precipitación se realiza debido a que la escorrentía superficial es función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía (CN) que tiene en cuenta el proceso de infiltración y de retención inicial en un proceso de lluvia sobre la cuenca.

El análisis de los datos de lluvia básicamente pretende obtener los valores correspondientes de precipitación asociados a un período de retorno de un evento de lluvia. Estos análisis se realizan analizando datos medios diarios de Adicionalmente, para emplear un modelo lluvia escorrentía se requiere conocer la distribución temporal de la tormenta cuyo volumen de precipitación corresponde al encontrado ya sea empleando valores obtenido de las series de precipitación, o el dato asociado a un periodo de retorno. Esta distribución temporal de las tormentas se estima empleando las curvas adimensionales de Soil Conservation Service de los Estados Unidos (SCS) quienes a partir de muchos datos de tormentas alrededor de los Estados Unidos, encontraron cuatro curvas típicas de distribución temporal de tormentas con duraciones de 24 horas y que se presentan en la Figura 4-23.

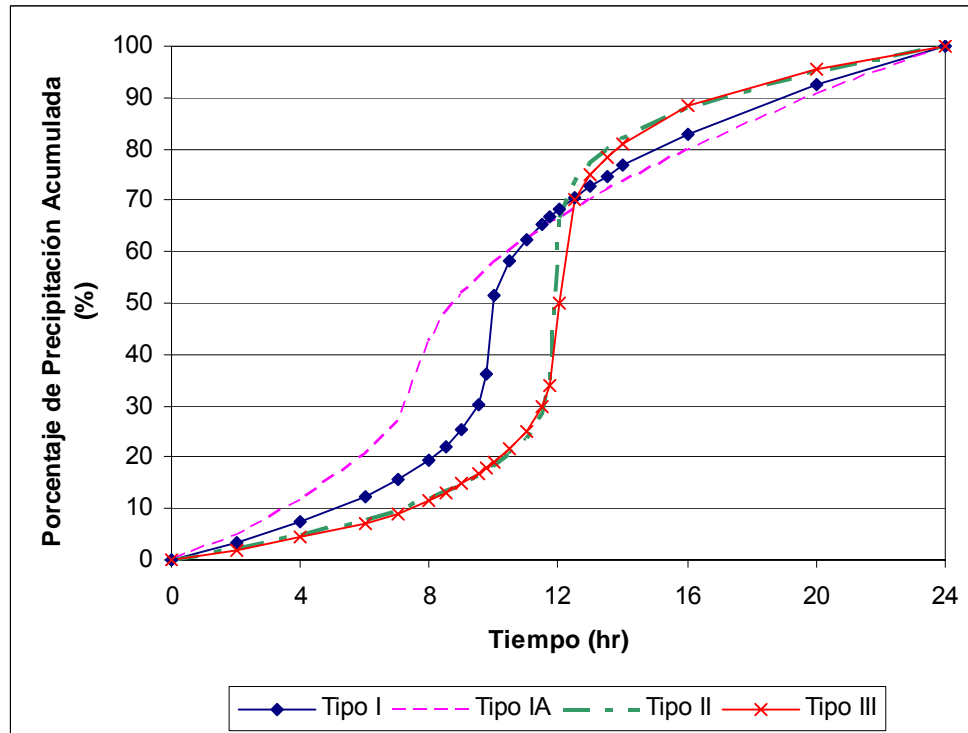


Figura 4-23. Curvas adimensionales del SCS.

Análisis de la infiltración en la cuenca

- **Método del Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las abstracciones y la precipitación efectiva**

El Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service - SCS), desarrolló un método para el cálculo de las abstracciones iniciales de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración cuantificada a partir de un parámetro conocido como el número de curva de escorrentía.

Si se conoce el volumen total de lluvia precipitada en una tormenta (P), y la distribución temporal de un aguacero (hietograma de lluvia, ver Figura 4-24), en éste una parte del volumen en el inicio de la lluvia, es retenido o interceptado en la vegetación o en depresiones topográficas, de forma que en un aguacero existe una pérdida de volumen inicial o abstracción inicial (I_a). De igual forma, parte de dicho volumen se infiltra en el suelo (F_a), de forma que una parte de la lluvia total es la que contribuye a la escorrentía directa (precipitación efectiva, P_e).

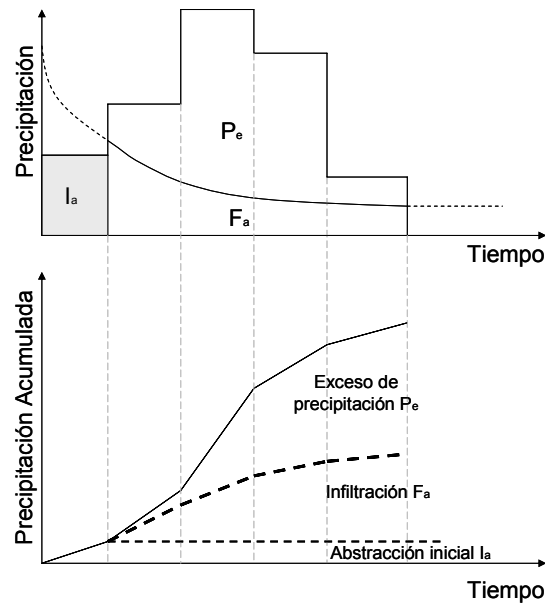


Figura 4-24. Método de abstracciones del SCS.

El método del SCS parte de la relación entre las siguientes cantidades:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad [4-7]$$

Donde S es la retención potencial máxima, o el almacenamiento; por el principio de continuidad,

$$P = P_e + I_a + F_a \quad [4-8]$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores,

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad [4-9]$$

Siendo esta la ecuación con la que se calcula la precipitación de exceso, conocidas las abstracciones iniciales que se pueden expresar en términos del almacenamiento, a partir de la expresión $I_a = C_a S$, siendo C_a un coeficiente que varía entre 0.15 y 0.20 para cuencas Colombianas.

El almacenamiento en la cuenca se puede expresar en términos de un parámetro adimensional que tiene en cuenta las características geomorfológicas del suelo, su uso y cobertura vegetal, siendo éste parámetro, de acuerdo a la metodología propuesta por el SCS, el número de curva (CN).

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (mm) \quad [4-10]$$

Este número de curva depende de la clasificación hidrológica del suelo, realizada a partir de la geomorfología de la zona de estudio, el uso del suelo, la condición del suelo, es decir si es pobre, aceptable o buena, y la condición de humedad antecedente.

Este parámetro varía entre 0 y 100, siendo un suelo con capacidad de almacenamiento infinito aquel que presenta un CN igual a 0, y un suelo sin ninguna retención o infiltración aquel que presenta un CN igual a 100.

Número de curva de escorrentía (CN)

El número de curva de escorrentía (CN) del Soil Conservation Service – SCS, fue desarrollado como un índice que representa la combinación de los grupos hidrológicos del suelo, el uso y la clase de tratamiento de la tierra. Análisis empíricos condujeron a deducir que el CN es función de tres factores: Clase de suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente (5 días).

Clasificación Hidrológica de los Suelos

El SCS, clasificó hidrológicamente más de 4.000 suelos basándose en su potencial de escurrimiento para lo cual los agrupó en cuatro grupos de suelos hidrológicos, los cuales se identifican con las letras A, B, C y D.

Suelo tipo A: Potencial de escurrimiento bajo. Suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas. Suelos con alta transmisión de agua.

Suelo tipo B: Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua.

Suelo tipo C: Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente suelos que contiene una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Estos suelos tienen baja transmisión de agua.

Suelos tipo D: Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión del agua muy baja.

Uso y Tratamiento del Suelo

La condición superficial en la cuenca hidrográfica se refleja en el uso del suelo y las clases de tratamiento. El uso del suelo está asociado a las coberturas forestales y vegetales de la cuenca como son el tipo de vegetación, los usos agrícolas, tierras en descanso, superficies impermeables y áreas urbanas. El tratamiento del suelo se aplica a las prácticas mecánicas como perfilado de curvas de nivel propias del uso agrícola, y prácticas de manejo como controles de pastoreo y rotación de cultivos.

En suelos cultivados se identifican: tierras en descanso, praderas, cultivos de hilera, cultivos de granos, rotaciones (pobre, aceptable, buena), cultivos en hileras rectas, vegetales sembrados cercanamente, campos sembrados a lo largo de la curva de nivel y cultivos en terrazas.

Condición Hidrológica del Suelo

El tipo de vegetación y la densidad de la cobertura en la cuenca tienen una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. Se definieron las siguientes categorías de cobertura para pasto natural. El porcentaje se estima cualitativamente en los planos respectivos:

- Pobre Menos del 50% de área cubierta por pasto. Alta intensidad de pastoreo.
- Aceptable 50 al 75% del área cubierta por pasto. Intensidad media de pastoreo.
- Buena 75% del área cubierta por pasto. Intensidad ligera de pastoreo.

La condición hidrológica para los bosques se determina igualmente cualitativamente como:

- Pobre bosques regularmente quemados con pocos arbustos y poco humus vegetal.
- Aceptable con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pasto.

- Buena Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.

Condición de Humedad Antecedente

La humedad antecedente tiene en cuenta la precipitación de los cinco días previos a la tormenta. La condición de humedad antecedente seca (AMCI) tiene el menor potencial de escorrentía con los suelos secos satisfactorio para cultivos. La condición de humedad antecedente promedio (AMCII) tiene un potencial de escorrentía medio. La condición de humedad antecedente húmeda (AMCIII) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la cuenca prácticamente saturada por precipitaciones anteriores, como se muestra en la Figura 4-24.

Condición de humedad Antecedente AMC	Precipitación acumulada de los cinco días previos al evento (cm)	
	Temporada Inactiva	Temporada de crecimiento
I	Menor 0.5	Menor 1.4
II	0.5 -1.1	1.4 -2.1
III	Mayor 1.1	Mayor 2.1

Tabla 4-6. Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente.

Existen cuadros de número de curva de escorrentía CN para varias coberturas de suelo hidrológico con condición antecedente AMC II (ver Chow V.T., 1994). Se han encontrado las siguientes relaciones las cuales se pueden usar para calcular los números de curva para condiciones antecedentes AMCI y AMCIII a partir de la condición promedio AMCII.

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{II}}{S_{III}} = 2.3 \quad [4-11]$$

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}} \quad [4-12]$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057CN_{II}} \quad [4-13]$$

Transformación lluvia escorrentía – Hidrograma unitario del SCS

A partir de varias series de hidrogramas reales correspondientes a cuencas de diversos tamaños, ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos, el SCS desarrolló un hidrograma unitario sintético adimensional.

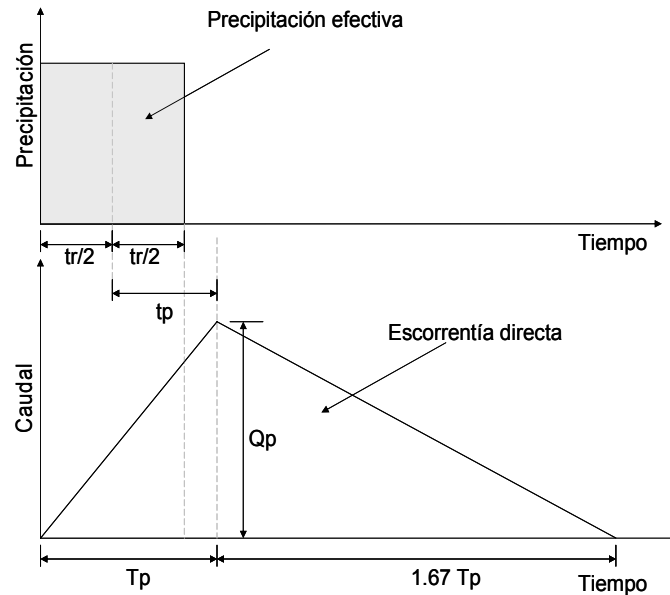


Figura 4-25. Hidrograma unitario del SCS.

En este hidrograma, el caudal pico se expresa en términos del área de drenaje (A) en kilómetros cuadrados, y el tiempo al pico (T_p), a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad [4-14]$$

Donde

$$T_p = \frac{tr}{2} + tp \quad [4-15]$$

Donde tr es el tiempo de duración de la lluvia y tp el tiempo de rezago o de retardo de la cuenca que se define como el tiempo comprendido entre el centroide del hidrograma de precipitación de exceso y el pico del caudal en el hidrograma. Cuando se conoce el tiempo de concentración (T_c), es posible determinar el tiempo de retardo asumiendo que $tr = 0.60 T_c$.

Aforos líquidos

A continuación se presenta el marco conceptual suministrado por la empresa AMAZONAS Ltda., quienes realizaron los aforos líquidos con base en trazadores, método al que han llamado “Inárida Deep Flow-IDF”.

Perspectiva cronológica

El método de medición de la dinámica de trazadores en flujos turbulentos corresponde a desarrollos propios propuestos por el grupo de investigación desde 1997, los cuales se han puesto en examen experimental en distintas oportunidades.

Comparación con los métodos convencionales

La parte cinemática

Mientras que los métodos convencionales de trazadores son fundamentados esencialmente sobre una base de la mecánica del punto, el método propuesto por Amazonas es de naturaleza más bien integral, dentro del método termodinámico.

Mientras los métodos convencionales parten casi todos de considerar la dinámica no Fickiana como un fenómeno objetivo en el sentido de que corresponde a intercambios reales de masa o energía en la periferia (modelo de “zonas muertas”) el modelo utilizado por Amazonas parte de que es un proceso virtual en el sentido de que un observador euleriano hará una composición de la velocidad advectiva (U_x) y las dos velocidades difusivas ($+V_{dif}$ y $-V_{dif}$) (Principio clásico de relatividad de Galileo) que explica la asimetría de las curvas, en tanto que un observador Lagrangiano no hará tal composición (pues $U_x = 0$ para él) siendo la curva esencialmente gaussiana *todo el tiempo*.

A partir de este supuesto se desarrolla una ecuación para la velocidad del cauce (U_x) en función del Coeficiente Longitudinal de dispersión, uniendo el campo de la hidráulica con el del transporte de masa. A partir de esta ecuación se puede hallar una ecuación modificada de Fick que describe apropiadamente las curvas reales no-Fickianas. Además esta función cumple con una ecuación más general de Taylor, demostrando con ello que se puede combinar la dinámica No-Fickiana con la puramente Fickiana.

La parte termodinámica

Los métodos convencionales de trazadores rara vez abordan el problema termodinámico mientras que el modelo propuesto por Amazonas se fundamenta *esencialmente* en este enfoque. En efecto, se puede demostrar que una de las

funciones que aparece en la ecuación de la velocidad en flujo no uniforme, es en realidad un símil del potencial termodinámico de Gibbs que acompaña el proceso de formación y desarrollo de la pluma de trazador, o sea que es una función de estado.

Esta función de estado puesta en el contexto de la realización de un equilibrio termodinámico en el eje transversal, permite hallar el valor específico de la función de estado cuando el trazador llega a las fronteras del canal y llena uniformemente la sección transversal, o sea la condición de “mezcla completa”.

Esta condición, fácilmente medible con el instrumento “INIRIDA DEEP FLOW” hace fácil verificar cuando el caudal tendrá un valor confiable en la medida en que las partículas de trazador han ocupado por entero el cuerpo de agua que pasa frente al observador.

La parte tecnológica

El método propuesto permite medir de forma muy repetible la velocidad advectiva (U_x) así como verificar el caudal por dos métodos diferentes: el desarrollado por Amazonas y utilizando el principio de conservación de la masa (cálculo del área bajo la curva).

Por otro lado al no considerarse un centroide de masa para la dinámica del trazador no se hace necesario tener *dos* curvas, y todas las mediciones se pueden hacer *en un solo punto*.

El IDF permite en el sitio y casi en tiempo real tener toda esta información sobre el cauce en estudio.

4.4 Cobertura y uso del suelo

El levantamiento de cobertura y uso de la tierra puede ser definido como el análisis y clasificación de diferentes tipos de cobertura y usos asociados que el hombre practica en una zona o una región determinada. Su importancia se fundamenta en que la información obtenida durante el estudio puede contribuir a la

solución de diversos problemas de interés para el hombre y su bienestar (Vargas, 1999).

Estos son algunos de los conceptos básicos usados para comprender los atributos de la biosfera.

Tierra: se entenderá como una entidad formada por la mutua interacción de la naturaleza viviente y no viviente en una porción de la superficie terrestre (IGAC, 1997).

Suelo: área delimitable de la superficie terrestre que abarca todos los atributos de la biosfera inmediatamente encima o debajo de esta, incluyendo el clima cercano, las formas del suelo y de la tierra, la superficie de la hidrología, poblaciones de plantas y animales, los patrones de arreglos y los resultados físicos de actividades humanas pasadas y presentes (FAO 2003).

Cobertura: se relaciona con los atributos de la tierra (cuerpos de agua, vegetación, vías, otros tipos de construcciones, cuerpos rocosos, cuerpos de nieve y superficies húmedas), algunos de estos naturales y otros afectados y/o producto de las necesidades del hombre (Forero, 1981). Estos atributos, son los rasgos que pueden ser directamente observados en las fotografías aéreas y frecuentemente en las imágenes de satélite (IGAC, 1997).

Unidad de cobertura: conjunto de elementos con características propias y diferenciables de conjuntos aledaños, que se pueden delimitar y que además se repiten en otros espacios (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit-GTZ-, 1999).

Uso de la tierra: es caracterizado por los arreglos, las actividades y las entradas realizadas por el hombre en un tipo particular de cobertura del suelo para producir, cambiarla o mantenerla (FAO, 2003). El uso de la tierra, relaciona la utilización y las actividades de manejo del suelo llevadas a cabo por el hombre para obtener productos y/o beneficios. Los productos son los materiales o salidas tangibles, mientras que los beneficios son inmateriales o intangibles (Van Wijngaarden, 1994).

Paisaje: es una síntesis de la realidad territorial que expresa las interacciones existentes entre la naturaleza y la sociedad, y debe entenderse como una expresión espacial de las formas socioeconómicas y no sólo como la superestructura que fundamenta y sustenta las interacciones orgánicas e inorgánicas (IGAG, 1997). El paisaje está constituido por dos partes, una visible que corresponde a su estructura y composición, denominada fenosistema y una no visible o criptosistema. Cuando un paisaje va a ser identificado, delimitado o caracterizado, la manera de analizarlo es a través de los aspectos relacionados

con el fenosistema, el cual a su vez representa una expresión sintética de los procesos ecosistémicos del paisaje (Etter, 1994). El fenosistema se compone de dos partes básicas que son, la morfología de la superficie terrestre o del terreno llamada geoforma y los elementos que la recubren, conocido como cobertura. La cobertura y la geoforma se comportan como indicadores de síntesis del paisaje por ser el resultado de la interacción espacio-temporal de los factores sistémicos; así, los cambios en el tiempo y en el espacio del paisaje se pueden percibir con el estudio de estos dos componentes (Vargas, 1992).

Clasificación de las coberturas y uso de tierras: es definido como el ordenamiento o arreglo de los objetos dentro de grupos o conjuntos sobre la base de sus relaciones; describe un armazón sistemático con los nombres de las clases y los criterios usados para distinguirlos entre ellos, así como las relaciones entre las clases. La clasificación necesariamente requiere de la definición precisa y clara en lo posible cuantitativa y sobre el criterio de un objetivo único, de los límites de las clases (Di Gregorio y Cansen, 1998). La cobertura vegetal como una clase de las coberturas comprende todo el manto vegetal de un territorio dado. Es de importancia por su capacidad asimilatoria de energía solar, por ser productor primario de casi todos los ecosistemas, y por la relación con los otros componentes del subsistema biofísico (estabilización de pendientes, control de erosión, control hídrico, definición de microclimas locales y hábitat de especies) (IGAC, 1997).

Cobertura de la tierra: es un término que se aplica a una fracción de tierra, la cual tiene características que la diferencian de otros sitios de una zona de estudio determinada. Tiene factores que pueden ser derivados de ambientes naturales o de ambientes creados y mantenidos por el hombre.

Uso de la tierra: Es la actividad que el hombre establece en una determinada cobertura, resultado de una interrelación entre los factores físicos, culturales, condiciones económicas que determinan las características y formas del tipo de uso.

4.4.1 Sistemas de clasificación

Existe gran cantidad de propuestas de diversos autores para clasificar la cobertura, dependiendo del aspecto analizado inherente a ella; los sistemas de clasificación más conocidos son:

Fisonómico-estructurales: Toma en cuenta formas de vegetación, copa, fuste, estratos, etc. (Fosberg, UNESCO, Yanganbi)

Relación fisiográfica: relaciona las formas del terreno con la cobertura vegetal. (Villota, CIAF)

Composición florística: Clasificación con base económica por especie, grupo, familias, comunidades, asociaciones según escala. (Braun – Blanquet)

Composición y estructura: enfoques mixtos que consideran aspectos florísticos y estructurales simultáneamente. (ITC)

Características radiométricas: clasificaciones basadas en la respuesta espectral de los diferentes tipos vegetales. (Sabins, Short, Gilg)

Descriptivo de cobertura y usos asociados: enfoques que diferencian tipos de cobertura vegetal y describen los usos que se hacen de estas coberturas. (Van Gils *et al.*)

Aspecto fisonómico- estructural. Fosberg (1961)

Una de las principales características de este sistema de clasificación, es que está basado estrictamente en la vegetación existente en un momento dado, e intencionalmente alude a criterios medioambientales para la clasificación. Se establecen unidades de vegetación asociadas a características del medio y como consecuencia la información obtenida es correlacionable con las características del medio.

Aspecto fisonómico- estructural. UNESCO (1966) (Tomado de Intituto Nacional de Ecología de Mexico)

Esta propuesta se deriva de un grupo de trabajo sobre clasificación y mapeo de vegetación convocado por la UNESCO y cuyos antecedentes se remontan a los años 60. La versión final fue revisada por Ellenberg y Mueller-Dombois en 1967, con la participación entre otros de Gaussen, Budowski, Ellenberg, Fränze, Germain, Küchler, Lebrun, D-Poore y Sochara. Esta clasificación fisonómica fue desarrollada como base para mapear la vegetación del mundo en una escala 1:1.000.000 o más pequeña. Pensando que podría hacerse una comparación global de hábitats ecológicos indicados por combinaciones iguales de formas de vida de plantas o formas de vida vegetales.

En este contexto, las formaciones vegetales y otras divisiones fueron concebidas como combinaciones de formas de vida vegetales, es decir, como unidades fisonómicas. Para nombrarlas introdujeron términos ecológicos y hasta donde fue posible, las definiciones se basaron en criterios fisonómicos. Como unidades de vegetación, se distinguen:

Clases de formaciones: Bosques cerrados; bosques abiertos; matorrales; matorrales enanos y comunidades relacionadas; comunidades herbáceas terrestres; formaciones de plantas acuáticas; áreas desérticas y áreas cubiertas escasamente por vegetación.

Subclases de formaciones: Bosques principalmente siempre verdes o perennifolios; bosques tropicales y subtropicales estacionales siempre verdes; bosques tropicales y subtropicales semidecíduos, etc.

Grupos de formaciones: Bosques umbrófilos tropicales (también llamados bosques lluviosos tropicales).

Formaciones: Bosques umbrófilos tropicales de tierras bajas; bosques umbrófilos tropicales submontanos.

Subformaciones: 1) de latifoliadas o 2) aciculifolios o esclerófilos y subdivisiones posteriores.

Aspecto fisonómico- estructural de Aubreville (Yangambi, 1956; Tomado de Malleux)

El sistema desarrollado por Aubreville (1956) fue la base sobre la cual se desarrolló el sistema de clasificación de la vegetación para el África, en el Acuerdo de Yangambi, el desarrollo de esta metodología se presenta a continuación.

Formaciones forestales cerradas (Dependientes del clima)

Son formaciones donde los árboles y arbustos se tocan, y se dividen en dos grandes grupos:

Bosques de baja y media altitud, donde se encuentran bosques densos húmedos, bosques densos secos, y matorrales leñosos.

Bosque denso húmedo: Población cerrada con árboles y arbustos de diferentes alturas; sin cubierta herbácea sobre el suelo, pero frecuentemente con plantas oprimidas, raramente plantas herbáceas no gramíneas de hojas anchas. Se identifica el bosque denso húmedo siempreverde en el que la mayoría mantiene sus hojas durante todo el año y el bosque húmedo semidecíduo en el que una alta proporción de árboles pierde las hojas una parte del año (Figura 4-26).

Bosque seco denso: población cerrada con árboles y arbustos que alcanzan diferentes alturas (pero generalmente menos altos que en el bosque húmedo); la mayor parte de los árboles de los estratos superiores pierden sus hojas una parte del año (excepcionalmente quedas con hojas); el soto bosque está formado por arbustos, sea siempreverdes o deciduos, y sobre el suelo se encuentran formaciones de gramíneas (Figura 4-27).

Mata de montaña: población cerrada formada únicamente por arbustos y plantas menores semidecídua, generalmente difícil de penetrar, sin estrato herbáceo y algunos espacios abiertos (Figura 4-28).



Figura 4-26. Bosque denso húmedo siempre verde.



Figura 4-27. Bosque denso húmedo siempre verde o deciduo.



Figura 4-28. Mata de montaña.

Bosques de montaña

El bosque húmedo denso de montaña: similar al bosque húmedo denso de baja y mediana altitud, pero con alturas menores de los árboles y arbustos, frecuentemente torcidos, más ramificados y cubiertos de hongos y líquenes, epífitas; bosque seco denso de montaña: similar al bosque de baja y mediana altitud, con árboles de menor altura y hojas rígidas (esclerofitas).

Mata de montaña: Similar a la mata de baja y mediana altitud pero los arbustos tienen las hojas generalmente rígidas.

Formaciones forestales dependientes de las condiciones edáficas

Los manglares, en el bosque del mar, conformado por asociaciones arbóreas con raíces emergentes, aeróbicas.

Bosque pantanoso situado en condiciones de suelo permanentemente inundado, muchas veces conformado por asociaciones de palmas.

El bosque periódicamente inundado.

Bosque rupícola, conformado por asociaciones forestales que se desarrollan en los bordes de los cursos de agua, en contacto con la corriente.

Formaciones mixtas forestales y gramináceas

Bosque abierto: población abierta con árboles de pequeña y mediano tamaño, en que las copas de los árboles son más o menos cercanos, el conjunto de la vegetación deja pasar la luz solar en abundancia; en el estrato inferior se

encuentran capas herbáceas de gramíneas que pueden estar mezcladas con otras plantas arbustivas o herbáceas (Figura 4-29).



Figura 4-29. Bosque abierto.

La sabana: Formación preponderantemente herbácea de grandes hierbas que al fin de la estación lluviosa alcanzan alturas de 80 cm. a 1 m, estas hierbas son generalmente quemadas cada año, durante la estación seca; sobre el estrato herbáceo se desarrollan otros estratos arbóreos o arbustivos que forman la sabana leñosa con árboles y arbustos que permiten pasar abundante luz solar, la sabana arbórea (árboles y arbustos dispersos), la sabana arbustiva y finalmente la sabana herbácea (ausencia de árboles y arbustos) (Figura 4-30).



Figura 4-30. Sabana Leñosa.



Figura 4-31. Sabana Arbórea.



Figura 4-32. Sabana Arbustiva.

La estepa: formación herbácea abierta, con concentraciones vegetales en grupos compactos dispersos (algunas veces asociadas con plantas leñosas). La estepa puede ser *arbórea* o *arbustiva* o estepa *arbustiva espinosa*, *estepa suculenta* o *estepa herbácea* (sin árboles o arbustos).

La pradera: *pradera acuática* (sobre aguas quietas o corrientes), *pradera pantanosa* (sobre suelos saturados de agua), *pradera de alta montaña* (en zonas de alta altitud).

Aspecto fisiográfico (Villota 1992; Tomado de CORPORACIÓN SUNA HISCA)

El análisis fisiográfico consiste en un método de interpretación de imágenes de la superficie terrestre basada en la relación existente entre fisiografía y suelo, teniendo en cuenta que el suelo es un elemento de los paisajes fisiográficos, y que al mismo tiempo, el entorno geomorfológico definido por el relieve, el material parental, y el tiempo junto con el clima, son factores formadores de tales paisajes, y por consiguiente de los suelos que presentan.

Este sistema de clasificación permite jerarquizar una zona cualquiera, de lo general a lo particular, utilizando una estructura piramidal ubicando en el vértice las estructuras geológicas de todo continente como son:

Cordilleras de Plegamiento

Escudos o Cratones

Geosinclinales o grandes cuencas de sedimentación

Luego de este punto de partida, distribuidas en orden descendente, se encuentran las siguientes categorías fisiográficas:

Provincia Fisiográfica

Unidad Climática

Gran Paisaje o unidad genética de relieve

Paisaje

Subpaisaje

Elemento del Paisaje

A continuación se define cada una de las categorías, mencionando los criterios adoptados para su establecimiento y se incluye un listado de las geoformas correspondientes.

Provincia Fisiográfica

También definida como región morfológica, corresponde a una región natural en la que se pueden presentar una o más unidades climáticas, estando conformada por conjuntos de unidades genéticas de relieve, con relaciones de parentesco de tipo geológico en cuanto a la litología y estructuras predominantes, topográfico referidas a nivel regional, y espacial, entendidas como la disposición de la unidad en el contexto medioambiental.

Este primer nivel de jerarquización, es utilizado en levantamientos de suelos de nivel exploratorio y esquemático, determinando unidades cartográficas a nivel de provincias fisiográficas.

Para Colombia, se definen las siguientes estructuras geomorfológicas y dentro de cada una se mencionan algunas provincias fisiográficas:

<i>Cordilleras de plegamiento</i>	<i>Escudos o Cratones</i>	<i>Grandes cuencas de sedimentación</i>
Cordillera Central	Saliente del Guainía – Vaupés	Amazonía
Cordillera Oriental	Serranía de la Macarena	Orinoquía
Cordillera Occidental	Serranía de Chiribiquete	Valle del Magdalena
Serranía del Baudó – Darién	Serranía de Tunahí – Naquen	Depresión Cauca – Patía
Sierra Nevada de Santa Marta		Depresión Atrato –San Juan
		Llanura del Pacífico
		Llanuras del Caribe
		Península de la Guajira
		Depresión del Catatumbo

Tabla 4-7. Provincias fisiográficas en Colombia.

Unidad Climática

Es la segunda categoría del sistema de clasificación, y comprende terrenos cuya temperatura anual promedio y condiciones de humedad, son lo suficientemente homogéneas para reflejarse en una geogénesis particular, en la formación de suelos, en la cobertura vegetal o en el uso actual de la tierra.

La clasificación de las unidades climáticas puede hacer referencia a sistemas predefinidos de clasificación climática, en los que se involucran aspectos como temperatura, altitud, humedad disponible, entre otras.

Es importante contar con una información climática lo suficientemente completa para llevar a cabo la clasificación según el nivel de detalle en que se esté trabajando.

Gran Paisaje o unidad genética de relieve

Esta categoría contiene unidades genéticas de relieve presentes en un terreno, pero cobijadas por una unidad climática determinada, que se encuentre en una provincia fisiográfica específica.

El parentesco geogenético, implica que la morfología general del relieve sea producto de unos procesos geomórficos endógenos mayores como plegamiento, vulcanismo, sedimentación, denudación, etc.

Generalmente, esta categoría corresponde al nivel más bajo de clasificación fisiográfica en los levantamientos de suelos de nivel exploratorio.

Paisaje Fisiográfico

Esta categoría es la unidad fundamental para levantamientos edafológicos no detallados. Está contenido en un Gran paisaje, pero que presenta unos atributos particulares como el tipo de material parental predominante, edad, entre otros. Se presentan a continuación algunos ejemplos de paisajes fisiográficos correspondientes a algunos tipos de gran paisaje.

GRAN PAISAJE	<i>Algunos paisajes fisiográficos correspondientes</i>
---------------------	---

GRAN PAISAJE	Algunos paisajes fisiográficos correspondientes
Relieve Montañoso estructural denudativo	Anticlinal simple Anticlinal indiferenciado Anticlinal excavados Sinclinal colgante Cresta homoclinal abrupta Cuesta
Relieve complejo volcano – denudativo	Volcán escudo Cono de escorias Manto de piroclásticos grueso Manto de ceniza volcánica
Relieve colinado denudacional	Farallones Valle glaciar heredado Colinas y cerros erosionales Campo de morrenas Montañas erosionales
Valle diluvial intramontano	Abanico o cono diluvial Colada de lodo Colada de Lahar Terraza diluvial

Tabla 4-8. Algunos ejemplos de paisajes correspondientes a grande paisajes. Tomado de Villota (1992).

Subpaisaje

Esta penúltima categoría, corresponde a una división de las unidades de paisaje, para efectos prácticos de la descripción de uso del suelo y su potencial. En este nivel se tienen en cuenta los siguientes parámetros de clasificación:

Forma y/o grado de pendiente

Tipo y grado de erosión acelerada

Clase de condición de drenajes en llanuras

Grado de disección natural o geológica en altiplanicies y geoformas agradacionales

Cuando los subpaisajes resultan de la división de un paisaje fisiográfico cuya composición litológica es homogénea, generalmente sólo reflejan diferentes condiciones de manejo de los suelos, mientras cuando los subpaisajes son el resultado de una subdivisión de un paisaje con heterogeneidad en su composición

litológica, la constitución pedológica, puede mostrar condiciones de contraste (Villota, 1992).

Elemento de paisaje

Esta categoría es la base para llevar a cabo levantamientos edafológicos detallados y ultradetallados, utilizando como criterio más frecuente de clasificación, la posición específica dentro de ciertos subpaisajes caracterizados por un micro relieve complejo. Los términos que se usan en este nivel son cóncavo, convexo; alto, medio, bajo.

Composición y estructura. ITC (1961)

Este sistema establece una clara distinción entre los conceptos de uso y cobertura y los clasifica en grupos de diferentes clases. De esta forma una cobertura puede tener dos o más tipos de uso y viceversa.

Aunque la relación uso – cobertura es muy estrecha, la diferencia entre estos dos términos es sustancial, así pues no es lo mismo hablar de pastos que de pastoreo, de construcciones que de vivienda o industria.

4.4.2 Interpretación de imágenes aplicada al uso y cobertura de la tierra

El levantamiento de uso y cobertura de la tierra es una de las múltiples aplicaciones de la interpretación de imágenes, debido a muchos factores determinantes de uso y cobertura pueden ser manipulados mediante las características propias de los sensores remotos. En concordancia con esto se hace necesario conocer la capacidad de registro de las imágenes, que está determinado por las resoluciones, que son espectrales, espaciales, radiométricas y temporales.

Resolución espectral: Capacidad que tiene el sensor para registrar en diferentes zonas o regiones del espectro electromagnético, lo cual se mide con el número de bandas que tenga el sensor, en donde las bandas representan zonas o regiones del espectro electromagnético. “La respuesta de un objeto cualquiera a la energía incidente, puede ser diversa en función del tipo de objeto y de la longitud de onda de que se trate, así como de la cantidad de energía incidente. Los objetos reaccionan al estímulo de energía, de manera distinta, es decir, la reflejan, la absorben, la transmiten de una manera particular característica de ese objeto” (Vargas, 1999), este comportamiento de la energía se expresa mediante:

$$I\lambda = A\lambda + T\lambda + R\lambda \quad [4-16]$$

La cantidad de energía incidente sobre un objeto I , de longitud de onda λ , es igual a la sumatoria de cantidad de energía absorbida A , energía transmitida T y energía reflejada R de longitudes de onda λ .

Resolución espacial: Capacidad que tiene el sensor para discriminar objetos por el tamaño, es decir, es el mínimo tamaño de un objeto que se puede discriminar en una imagen. Depende del diseño y tipo de detector con que cuenta el sensor; el tamaño de área de terreno que se registra en un píxel corresponde al valor de la resolución espacial de la imagen a la cual pertenece el píxel¹. Es importante tener en cuenta que el sensor registra un promedio de reflectancias causadas por los objetos o coberturas presentes en un área de terreno, equivalente a su resolución espacial.

Resolución radiométrica: Capacidad que tiene el sensor para discriminar los valores digitales asignados a cada objeto.

Resolución temporal: Es el intervalo de tiempo o lapso que transcurre entre la toma de dos escenas de la misma imagen, de tal manera que esta depende del sensor y del programa al que pertenezca dicha imagen.

Firma espectral: huella espectral o respuesta espectral, es el comportamiento particular de cada objeto en cada longitud de onda y es la base para la detección, reconocimiento e identificación de los diferentes objetos registrados en una imagen.

Curvas de reflexión: es la manera como la huella espectral de diversos objetos es registrada en gráficos o curvas ploteadas sobre coordenadas cartesianas que abarcan determinado rango del espectro electromagnético. En la Figura 4-33 se presentan aquellas curvas típicas de reflexión que constituyen la cobertura terrestre.

¹ Píxel: unidad de registro o elemento de escena (Picture element)

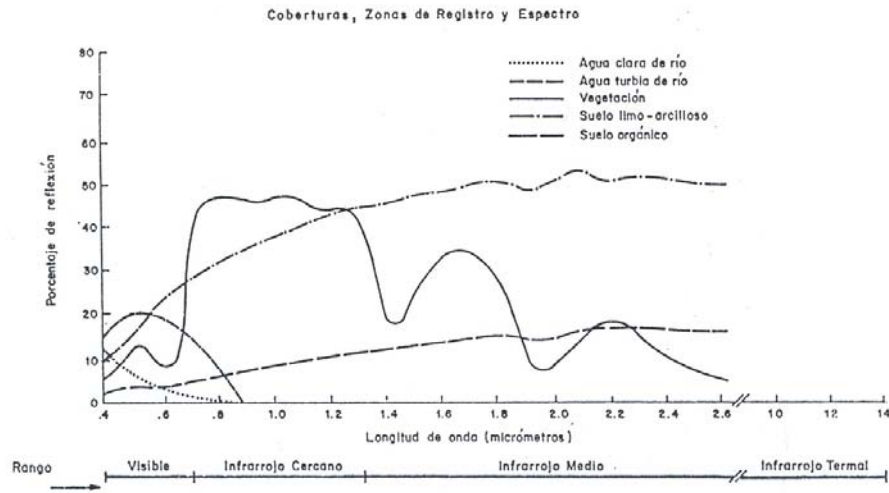


Figura 4-33. Curvas típicas de reflexión que constituyen la cobertura terrestre.

Procesamiento digital de imágenes de satélite

El procesamiento de imágenes digitales, o manejos computarizados de imágenes de satélite y otros sensores, permite la combinación, filtraje y extracción de la información de manera que esta sea más objetiva y precisa; lo cual necesita de una adecuada utilización de las propiedades y características espectrales de los materiales que constituyen cobertura y de la manera como estos materiales aparecen registrados en las imágenes.

Realces: Es el proceso de hacer una imagen más interpretable para una paliación particular, es decir, que algunas de las características más importantes sean percibidas de una mejor manera al ojo humano. Los realces más usados son, radiométricos, espaciales y espectrales.

Realces radiométricos: Estos trabajan con los niveles individuales de los píxeles de la imagen; dado que los niveles para cada banda de un sensor pueden ser diferentes, estos realces no pueden ser los mismos para las bandas de un mismo sensor, por consiguiente el realce radiométrico de una imagen multibanda puede ser considerado como una serie de realces independientes de una sola banda. Los realces radiométricos son:

- **Expansión del contraste:** este consiste en que a un determinado grupo de datos de entrada, que puede ser angosto, es decir, su histograma es angosto, mediante la aplicación de una función lineal, gamma, exponencial, etc, según sea el caso, su histograma se ensanche, es decir, los valores de

brillo de salida para los mismos píxeles se expanden sobre un rango mas amplio, como se puede apreciar en la Figura 4-34.

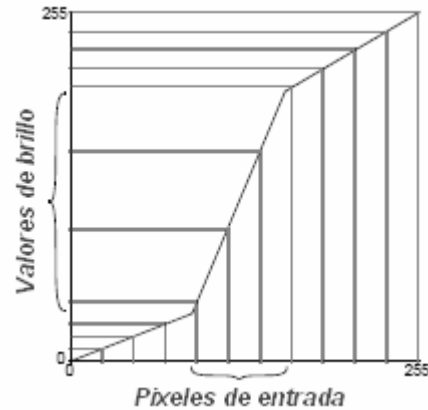


Figura 4-34. Valores de brillo de salida.

- Igualación de histograma: es una expansión no lineal que redistribuye los valores del píxel para que haya aproximadamente el mismo número de píxeles en cada valor dentro de un rango, por lo tanto el contraste se aumenta en los picos del histograma y disminuye en las colas del histograma, Figura 4-35.

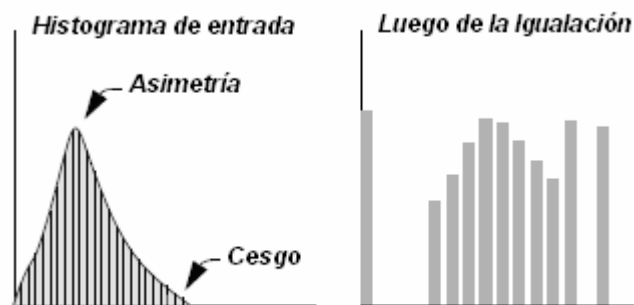


Figura 4-35. Histograma de variación.

- Ajuste de histogramas: es el proceso de determinar una tabla de color que convierta el histograma de una imagen al histograma de otra; lo cual es útil para emparejar datos de la misma escena o de escenas adyacentes que se

obtuvieron en días diferentes, o que son ligeramente distintas debido al ángulo solar o a los efectos atmosféricos, Figura 4-36.

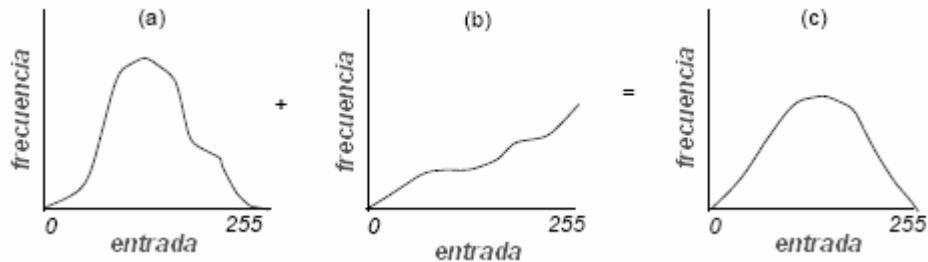


Figura 4-36. Proceso para el ajuste de histogramas.

Realces espaciales: Estos modifican los valores de píxel basados en los valores de los píxeles contiguos; estos realces consideran ampliamente la frecuencia espacial, que es la diferencia entre los valores más altos y más bajos de un grupo de píxeles contiguos; La ubicación de estos valores contiguos está dada por una ventana denominada *kernel*, que se construye alrededor de cada uno de los elementos. Los realces espaciales se clasifican en:

- Filtros de paso alto: estos en el dominio espacial, refuerzan las diferencias en la frecuencia espacial, o sea la diferencia entre elementos, es decir, se realzan los bordes.
- Filtros de paso bajo: estos filtros lo que hacen es una homogenización, por lo tanto estos filtros son mas usados para tratar de eliminar ruido o bandeamiento en imágenes.

Realces espectrales: Estos requieren más de una banda de datos. Sus principales usos se dan para compresión de datos de bandas que son similares, extracción de nuevas bandas que sean visualmente más interpretables, aplicación de algoritmos y transformaciones matemáticas. Los realces espectrales son:

- Análisis de componentes principales: se usa frecuentemente como un método de compresión de datos, es decir, permite que los datos redundantes se compacten en unas pocas bandas, puesto que la dimensionalidad de los datos se reduce. Los datos de las bandas que se

obtienen al aplicar componentes principales no están correlacionados, son independientes y por lo regular son más interpretables que los datos fuente.

- Tasseled Cap: esta transformación ofrece una manera de optimizar la visualización de los datos para estudios de vegetación; esta optimización se expresa en tres ejes principales denominados, brillo (el cual es una suma ponderada de todas las bandas), verdor (es ortogonal al brillo, y es un contraste entre las bandas del infrarrojo y el visible), y humedad (relacionado con la humedad del suelo y del dosel).
- Transformación de RGB a IHS (RGB – IHS): esta transformación es la posibilidad que hay de pasar de un sistema color a otro que sea más similar a lo visto por el ojo humano, pero no tendrá características espectrales como tal. Este espacio de color alternativo usa la intensidad (I = es el brillo total de la escena y varía de 0 a 1), la saturación (S = representa la pureza del color y varía de 0 a 1), y el matiz (H = es representativo del color o de la longitud de onda dominante del píxel; varía desde 0 en el punto medio del rojo hasta el verde y el azul hasta volver al punto medio del rojo en 360), Figura 4-37.

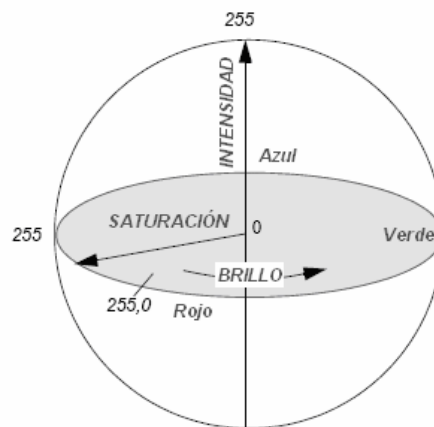


Figura 4-37. Transformación de RGB a IHS (RGB – IHS).

- Índices: son usados para crear imágenes de salida que combinan matemáticamente los valores de los niveles digitales de bandas diferentes; en general son cocientes derivados de la absorción/reflexión del material de interés. Los índices son usados ampliamente en explotación minera y análisis de vegetación para encontrar pequeñas diferencias entre tipos de rocas y clases de vegetación, también son usados pero en una menor

medida para minimizar los efectos de sombra en las imágenes multiespectrales.

4.5 Inventario de deslizamientos y procesos erosivos

Los análisis de amenaza y riesgo por deslizamientos se basa en todos los caso en un inventario de deslizamientos. Por una parte en modelos estadísticos y heurísticos esta información se toma para dar valores de peso a cada una de las variables, por otro lado, en los modelos físicos, el inventario de procesos se utiliza como herramienta para calibración.

De igual forma con el fin de identificar los factores condicionantes y contribuyentes a los procesos de inestabilidad, el inventario se convierte en una herramienta fundamental para entender las relaciones entre los mecanismos de falla identificados y los factores identificados en el inventario.

El inventario de procesos dentro de la cuenca se hizo con base en la metodología propuesta por el Ingeominas dentro del marco del Proyecto Multinacional Andino (PMA). Los conceptos y definiciones asociados con este método se incluyen como Anexo A -1 a este informe.

4.6 Exploración geofísica

Dentro de la Geofísica, ciencia que estudia las propiedades físicas de la Tierra y de los elementos que la constituyen, se han generado una gran cantidad de métodos que permiten realizar el reconocimiento de estos elementos sin necesidad de perforarlos destruirlos. De esta manera se pueden identificar diversos tipos de rocas, espesores de yacimientos y geometría de los deslizamientos para establecer la ruta más óptima para obtener los mejores resultados, siempre utilizando las propiedades físicas que permiten distinguir más fácilmente a estos materiales.

En un área, al conocerse las propiedades físicas de las rocas y los depósitos que constituyen una cuenca, se pueden reconocer mejor los problemas que se encuentran en esta región, así como la manera más conveniente de solucionarlos. Debido a la escasa resolución que se obtienen con muestras obtenidas en sitios puntuales, se hace necesaria la utilización de técnicas geofísicas que permitan definir de mejor forma el modelo geológico-geotécnico en el área de estudio. Las principales técnicas utilizadas para la exploración geofísica son la Resistividad Eléctrica y la Refracción Sísmica. A continuación se expone de

manera muy general los conceptos básicos en que se fundamenta cada uno de estas técnicas.

4.6.1 Resistividad eléctrica

Para la identificación de las discontinuidades geoelectricas del subsuelo, se utilizó el método de exploración geoelectrico con dos diferentes arreglos: El sondeo Eléctrico Vertical (SEV), con arreglo Schlumberger, el cual permite conocer puntualmente la resistividad del subsuelo y la Tomografía Eléctrica, con arreglo Wenner- Schlumberger, que muestra la distribución de la resistividad a lo largo de un perfil del subsuelo.

Sondeo Electrico Vertical

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), consistente en determinar los contrastes de resistividad del subsuelo a diferentes profundidades para luego dar una interpretación litológica de éste. Para llevar a cabo lo anterior, se introduce una corriente (A y B), entre dos electrodos de potencial (M y N), obteniendo la diferencia de potencial. Los electrodos se ubican a unas distancias previstas y pueden variar según las condiciones de campo. La distancia media entre los electrodos de corriente, es proporcional a la profundidad de investigación (Figura 4-38) En la zona de estudio se efectuaron cuatro Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), consistentes en un arreglo Schlumberger de cuatro electrodos en los que se contó con $AB/2$ máximo de 100 m. La Figura 4-39 muestra un equipo para la toma de los registros eléctricos.

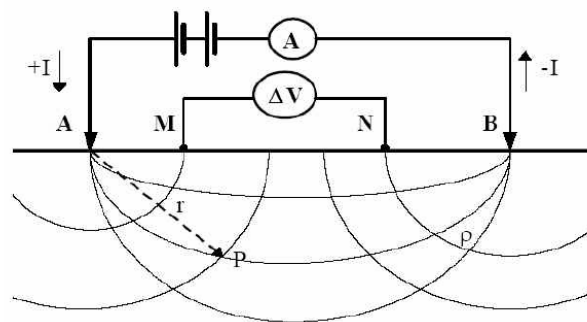


Figura 4-38. Sondeo Eléctrico Vertical



Figura 4-39. Equipo de geoelectricidad para la toma de Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografías Eléctricas

Tomografía eléctrica

La tomografía se define como la representación de una propiedad, magnitud o campo físico en un corte o sección. En este caso particular la tomografía eléctrica permite obtener información del comportamiento de la resistividad eléctrica en dirección vertical y horizontal en el subsuelo. Cabe destacar que como en todo método de exploración geofísica indirecto, la profundidad obtenida no es absoluta. Para la realización de tomografías eléctricas en dos dimensiones se emplean de igual manera los arreglos de electrodos empleados en sondeos eléctricos verticales (SEV).

La tomografía eléctrica combina automáticamente un gran número de electrodos previamente clavados en el terreno con separación equidistante, todos estos electrodos se conectan simultáneamente al equipo de medida y mediante un programa secuencial específico para cada trabajo, el aparato “ordena” cuáles deben ser los conjuntos de cuatro electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición (Figura 4-40).

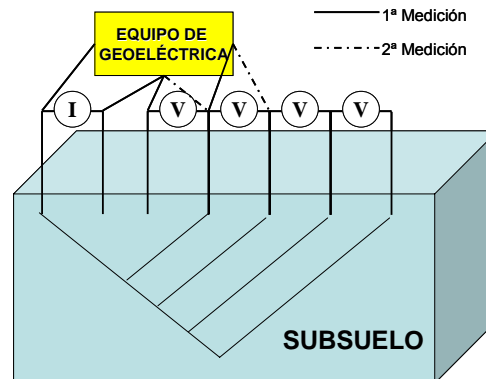


Figura 4-40. Esquema de la disposición de electrodos para la tomografía.

El arreglo utilizado para las tomografías eléctricas es el Dipolo – Dipolo (Figura 4-40), en donde se ubican dos electrodos de corriente (I en la Figura 4-40) y dos electrodos de voltaje (V en la Figura 4-40). Se induce la corriente eléctrica por los electrodos de corriente y se mide el voltaje generado por los electrodos correspondientes a esta lectura. Para la siguiente medida la lectura, se realiza la inyección de corriente por el mismo par de electrodos iniciales (I en la Figura 4-40), pero la lectura de voltaje se realiza en el siguiente par de electrodos. De esta manera a mayor distancia entre los electrodos de corriente (I en la Figura 4-40) y los de potencial (V en la Figura 4-40), el poder de penetración en la lectura será mayor.

4.6.2 Refracción sísmica

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción – o reflexión - sísmica. Por medio de una sección sísmica se puede conocer:

- El espesor de las capas
- La profundidad de la roca
- El tipo de roca
- La integridad de roca

La superficie, a lo largo de las secciones planeadas, tiene que ser aclarada de la vegetación. La anchura requerida es 1.5 m. Un punto de la referencia topográfica debe ser proporcionado para atar las secciones a la red topográfica local.

A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido (Figura 4-41).

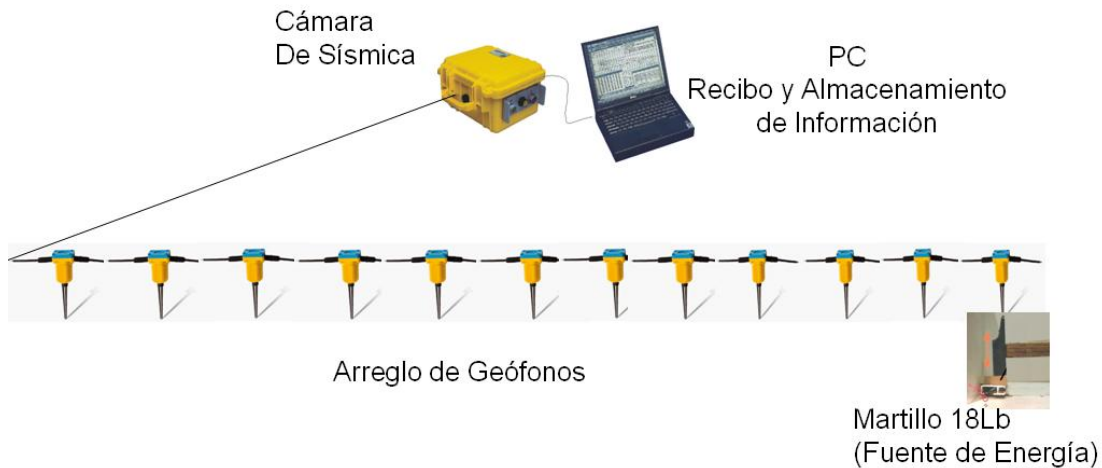


Figura 4-41. Arreglo de Sísmica de Refracción.

El equipo básico consiste de los sensores o geófonos, 12 en este caso; la cámara de registro sísmico, en donde se almacenan los datos de las vibraciones en el terreno detectados por cada geófono; los cables de conexión entre los sensores y la unidad de registro; el cable del *trigger*, que se encarga de marcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición.

4.7 Estimación de la producción de sedimentos por procesos erosivos

La erosión y sedimentación pluvial involucra los procesos de arranque, transporte y depositación de partículas de suelo, siendo las principales fuerzas actuantes la de impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y la fuerza hidrodinámica provocada por la escorrentía.

Los procesos erosivos son función del clima, las propiedades geomecánicas del suelo, la topografía, la cobertura del suelo y la intervención antrópica. Entendiendo la complejidad de los factores que controlan el proceso y la dificultad en su

medición, en principio se presenta el modelo matemático aplicable a aquellas situaciones ideales en las que las variables pueden ser perfectamente medidas y controladas, y en segunda instancia, se presentan algunas generalidades de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo como el modelo más ampliamente difundido, el cual corresponde a una aplicación empírica que permite obtener datos de la pérdida de suelo de manera aproximada.

4.7.1 Modelo fundamental de erosión

A fin de presentar la formulación matemática del proceso, se debe entender que la erosión se inicia con el arranque mediante el impacto o la acción de fuerzas de tracción actuando sobre partículas individuales de suelo en la superficie, y que los factores que controlan tal proceso son la intensidad y duración de la precipitación, la rugosidad del terreno, la longitud y pendiente de la ladera, la erodabilidad inherente al suelo y el tipo de cobertura.

La formulación matemática que busca modelar el proceso de erosión–depositación, parte de una ecuación fundamental de conservación de masa que tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial qs}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t} = Dr + Di \quad [4-17]$$

Donde:

qs = Carga de sedimentos

x = Distancia desde donde se inicia la escorrentía, medida sobre la cara del talud

ρ_s = Densidad de las partículas de suelo

y = Profundidad del flujo

t = Tiempo

Dr = Tasa de depositación en los canales de erosión

D_i = Tasa de depositación entre canales

q , D_r y D_i son medidos por unidad de ancho.

$\frac{\partial qx}{\partial x}$ Representa el cambio en la carga de sedimentos a lo largo de la ladera

$\rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t}$ Representa la variación en la concentración de sedimentos con el tiempo

Realizando una simplificación, para flujos superficiales y gradualmente variados,

$\rho_s \frac{\partial(Cy)}{\partial t}$ puede ser despreciado y por lo tanto:

$$\frac{\partial qx}{\partial x} = D_r + D_i \quad [4-18]$$

Por otro lado, la carga de sedimentos siempre estará ligada a la capacidad de transporte de la escorrentía. Partiendo de este hecho, Foster y Meyer, proponen una función en la que el arranque y la depositación de material son proporcionales a la diferencia entre la capacidad de transporte y la carga de sedimentos, así:

$$D_r = C_1 * (T_c - q_s) \quad [4-19]$$

T_c , Capacidad de transporte

C_1 , Constante en unidades de L^{-1}

La máxima capacidad de arranque D_{re} es proporcional a la capacidad de transporte

$$D_{re} = C_1 * T_c \quad [4-20]$$

Donde C_1 es función del tamaño de las partículas transportadas

Foster y Meyer, relacionan la capacidad de transporte y la carga de sedimentos como sigue:

$$\frac{Dr}{Dre} + \frac{qs}{Tc} = 1 \quad [4-21]$$

Por lo tanto, cuando la máxima capacidad de arranque es igual a la tasa de depositación, la carga de sedimentos es igual a cero. De igual forma, cuando la carga de sedimentos es igual a la capacidad de transporte, la tasa de depositación es igual a cero.

$\frac{Dr}{Dre}$, muestra la cantidad relativa de energía gastada en el arranque de sedimentos.

$\frac{qs}{Tc}$, muestra la cantidad relativa de energía gastada en el transporte de sedimentos.

4.7.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

La ecuación universal de pérdida de suelo proporciona una herramienta simple para determinar la cantidad de suelo erosionado como un promedio anual, en función de datos meteorológicos, características del suelo, topografía, cobertura e intervención antrópica.

La ecuación plantea una relación entre la pérdida de suelo medida en unidades de peso por unidad de área y por unidad de tiempo, y los seis factores que empíricamente han mostrado algún grado de correlación, cuatro de ellos adimensionales y los otros dos con unidades que representan por un lado la energía de la lluvia y por el otro la erodabilidad del suelo.

La forma de la ecuación universal de pérdida de suelo es la siguiente:

$$A = R * K * S * L * C * P \quad [4-22]$$

$A =$ Promedio espacial y temporal de pérdida de suelo expresada en las unidades del factor K y para el periodo de tiempo manejado en las unidades de R. En la práctica, usualmente es expresado en Ton / (Acre * Año) o en Ton / (Hectárea * Año).

$R =$ Factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía, expresado en (Pie * Ton) / Acre o en MegaJules / Hectárea.

- K = Factor de erodabilidad del suelo
- S = Factor de inclinación de la ladera
- L = Factor de longitud de la ladera
- C = Factor de cobertura
- P = Factor de prácticas de protección

El factor de erosividad, R

El valor numérico de R cuantifica el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, además de reflejar la cantidad y proporción de escorrentía. El factor no debe considerarse como un parámetro únicamente de energía ya que una tormenta de gran intensidad y poca duración, puede tener la misma energía total que una tormenta de poca intensidad pero larga duración. Así las cosas, el factor R debe ser visto como un factor de interacción que refleja la relación particular entre la energía total y la intensidad pico, lo cual, técnicamente refleja la capacidad de desprender las partículas del suelo, combinada con la capacidad de transporte.

En términos generales el factor R es calculado como sigue:

$$R = \sum E * I_{30} \quad [4-23]$$

E = Energía total

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos

Por otro lado, la energía total se calcula como el producto de la energía cinética (e) por la precipitación (P):

$$E = e * P \quad [4-24]$$

La energía cinética (e) de una tormenta es función del tamaño de las gotas de lluvia y de la velocidad terminal con la que éstas impactan el suelo, variables que fueron relacionadas empíricamente por Weischmeier y Smith (1958) con la intensidad de la lluvia, tal como lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$e = 916 + 331 * \log(i) \quad \text{Para } i \leq 3 \text{ pulgadas / hora} \quad \left[\frac{ft * Ton}{Acre * Pulgada} \right] \quad [4-25]$$

$$e = 1074 \quad \text{Para } i > 3 \text{ pulgadas / hora} \quad \left[\frac{ft * Ton}{Acre * Pulgada} \right] \quad [4-26]$$

$$e = 1099 * \left[1 - 0.72 * \exp^{(-1.27*i)} \right] \quad \left[\frac{ft * Ton}{Acre * Pulgada} \right] \quad [4-27]$$

Donde i en estas ecuaciones debe tener unidades de pulgadas / hora.

Para usos prácticos es usual realizar el análisis para hallar el valor de R , sólo sobre tormentas superiores a 0.5 pulgadas, además de las tormentas con una intensidad superior a 0.25 pulgadas en 15 minutos.

Para una tormenta dada, el factor R puede ser calculado a partir de una ecuación de la forma:

$$R = \frac{a_1 * P^{f(D)}}{D^{b_1}} \quad [4-28]$$

Donde a_1 y b_1 son constantes definidas por el tipo de tormenta (Ver Cooley, 1980)

P = Precipitación

D = Duración de la tormenta

y

$$f(D) = 2.119 * D^{0.0086} \quad [4-29]$$

El factor de erodabilidad del suelo, K

La erodabilidad es un parámetro que muestra la respuesta del perfil del suelo al poder erosivo de las tormentas, es decir, relaciona la acción combinada de precipitación, escorrentía e infiltración, con las propiedades geomecánicas del suelo.

Estrictamente la erodabilidad es la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad pluvial y representa el efecto de las propiedades del suelo mismo y de las características del perfil estratigráfico sobre la pérdida de suelo.

Estudios previos han mostrado que la erodabilidad de un suelo es función de sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas y de la interacción entre ellas, lo que hace que las correlaciones existentes en la literatura, sean aplicables de manera estricta sólo a los suelos objeto de estudio y que cualquier extensión de sus resultados, debe ser realizada de manera prudente y entendiendo las limitaciones de tal práctica.

Las variables que mayor influencia tienen en el comportamiento de la erodabilidad pueden ser caracterizadas mediante la distribución granulométrica, el porcentaje de materia orgánica, la estructura y permeabilidad del perfil estratigráfico, las características de agregación de las partículas de suelo, la composición mineralógica y la densidad.

Existen correlaciones para estimar el valor del factor de erodabilidad entre las que se destacan el Nomograma de Weischmeier y las presentadas a continuación, todas ellas con las limitaciones que se mencionan.

Nomograma de Weischmeier

El nomograma de Weischmeier presentado en la Figura 4-42 fue desarrollado para suelos de textura media en zonas de clima templado, y permite encontrar el valor de K en función de la suma de los porcentajes de limo y arena fina, el porcentaje de arena media, el porcentaje de materia orgánica y la caracterización de la estructura del suelo y de su permeabilidad.

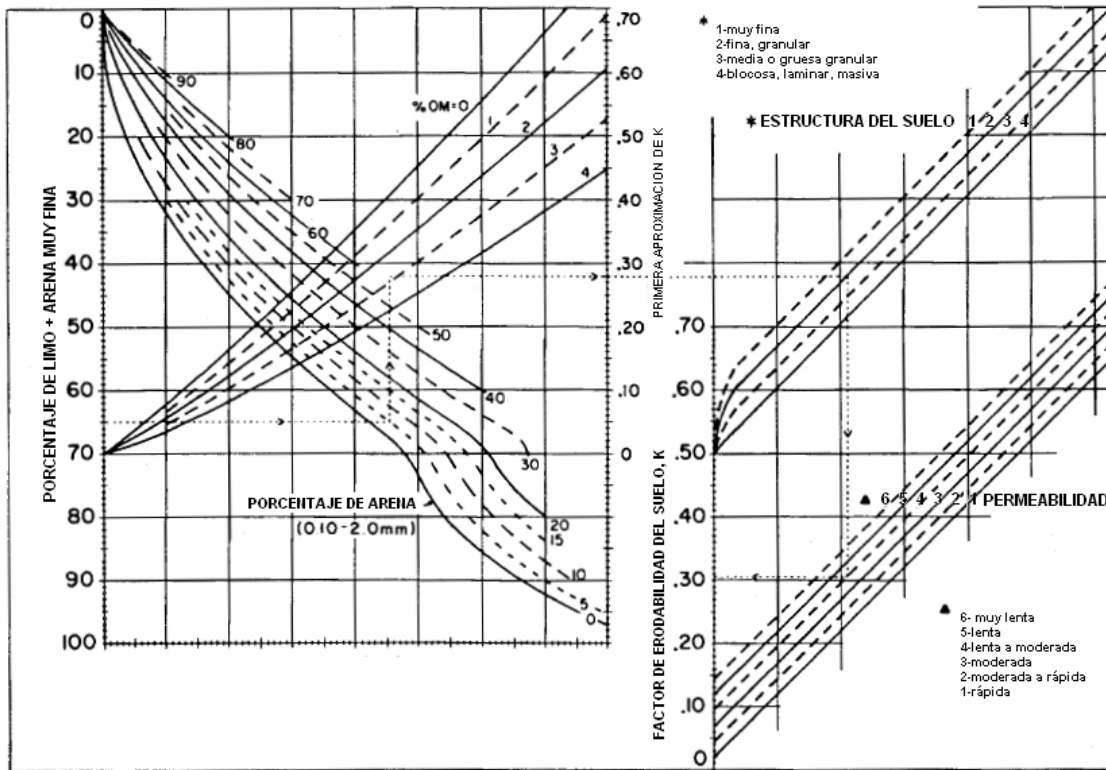


Figura 4-42. Nomograma de Weschmeier

El código de permeabilidad mostrado en la Tabla 4-10 y utilizado en el nomograma de Weichmeier está dado para la fracción de suelo de tamaño inferior a 2 mm, por lo que debe ser corregido considerando que la conductividad hidráulica se ve afectada por la presencia de partículas superiores al tamaño mencionado, como sigue:

$$kb = kf(1 - Rw) \quad [4-30]$$

Donde R_w es el porcentaje en peso de las partículas mayores a 2 mm.

k_f = Conductividad hidráulica de la fracción fina del suelo (< 2 mm)

Aproximación algebraica del Nomograma de Weichmeier:

La ecuación empírica mostrada a continuación, fue desarrollada para suelos con porcentaje de limo inferior o igual a 70%.

$$K = \frac{2.1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1.14} + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)}{100} \quad [4-31]$$

OM = Porcentaje de materia orgánica

M = Porcentaje de partículas entre 0.002 y 0.1 mm multiplicado por la suma de los porcentajes de limo y de arena

S = Clase de estructura (1...4)

Clase	Descripción
1	Granular muy fino
2	Granular fino
3	Granular grueso
4	Aterronado o macizo

Tabla 4-9. Clase de estructura.

Ecuación simplificada para la evaluación del parámetro K

Esta correlación es aplicable a los casos en los que no se cuente con el contenido de materia orgánica o en aquellos casos en los que la información sobre la distribución granulométrica sea incompleta.

$$K = 7.594 * \left\{ 0.0034 + 0.0405 * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log}(Dg) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad [4-32]$$

$$Dg = \exp[0.01 * \sum f_i * \text{Ln}(m_i)] \quad [4-33]$$

f_i es el porcentaje de un tamaño de partículas dado.

m_i es la media aritmética de los tamaños de las partículas

Código	Descripción	Permeabilidad	
1	Arcilla, Arcilla limosa	Rápida	> 2.4 pulg/Hora
2	Materia orgánica arcillo limosa, Arena, Arcilla	Media a Rápida	0.8 – 2.4 pulg/Hora pulg/Hora
3	Materia orgánica arcillo arenosa o arcillosa	Moderada	0.2 – 0.8 pulg/Hora
4	Materia orgánica, Materia orgánica limosa	Baja a media	0.08 – 0.2 pulg/Hora
5	Arena mezclada con materia orgánica	Baja	0.04 – 0.08 pulg/Hora
6	Arena	Muy baja	< 0.04 pulg/Hora

Tabla 4-10. Código de Permeabilidad.

Ecuación simplificada para la evaluación del parámetro K

Esta correlación es aplicable a los casos en los que no se cuente con el contenido de materia orgánica o en aquellos casos en los que la información sobre la distribución granulométrica sea incompleta.

$$K = 7.594 * \left\{ 0.0034 + 0.0405 * \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log}(Dg) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad [4-34]$$

$$Dg = \exp[0.01 * \sum f_i * \text{Ln}(m_i)] \quad [4-35]$$

f_i es el porcentaje de un tamaño de partículas dado.

m_i es la media aritmética de los tamaños de las partículas

Los factores topográficos L y S

El efecto de la topografía sobre la erosión es medido mediante el factor LS, considerando que la pérdida de suelo es directamente proporcional a la longitud y a la pendiente de las laderas.

La longitud de la ladera, λ , está definida como la longitud de la proyección horizontal medida desde el punto donde se inicia la escorrentía hasta el punto en donde ocurre la depositación o donde la escorrentía se concentra en un canal definido.

El factor L se evalúa como sigue:

$$L = \left(\frac{\lambda}{72.6} \right)^m \quad [4-36]$$

Donde λ es la proyección horizontal entre el punto donde se inicia la escorrentía y la zona de descarga o de depositación.

72.6 es la longitud unitaria en pies

m es el exponente de longitud, el cual es función de la relación entre la erosión causada por la escorrentía o flujo y la ocasionada por el impacto de las gotas de lluvia al caer, el cual se puede calcular como sigue:

$$m = \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right) \quad [4-37]$$

$$\beta = \left(\frac{\frac{\text{Seno}(\theta)}{0.0896}}{3.0 * (\text{Seno} \theta)^{0.8} + 0.56} \right) \quad [4-38]$$

θ es la pendiente del talud.

El factor S se evalúa como sigue:

$$S = 10.8 * \text{Seno}(\theta) + 0.03 \quad \text{Para pendientes menores al 9 \%} \quad [4-39]$$

$$S = 16.8 * \text{Sen}(\theta) - 0.50 \quad \text{Para pendientes mayores o iguales al } 9 \% \quad [4-40]$$

El factor de cobertura, C

El factor C describe el efecto protector de la cobertura vegetal contra la pérdida de suelo, asignando un valor entre 0 y 1, como resultado de la comparación de las características de cobertura específicas del sitio de interés, frente a la situación de tener un suelo completamente desnudo en cuyo caso el factor C adquiere un valor de 1.0.

El factor C es función de variables tales como el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, el uso previo del suelo, la rugosidad superficial, la cantidad y características de la biomasa bajo la superficie del terreno y la humedad del suelo, entre otras.

La cantidad de variables que afectan el valor del factor C y la dificultad en su medición, han provocado el desarrollo de tablas que básicamente permiten la obtención del valor de C en función del tipo y porcentaje de cobertura, tanto a nivel de la superficie del terreno como la cobertura aérea.

El factor de prácticas de protección, P

Este factor sólo es aplicable a aquellas situaciones en las que se realice algún tipo de control de erosión mediante la ejecución de obras de protección o de preservación, caso en cual, la ecuación de pérdida de suelo, es afectada por un valor inferior a la unidad dependiendo del tipo y eficiencia de las obras realizadas.

4.8 Análisis de inestabilidad de las bancas por procesos de socavación

En cuencas cubiertas por suelos coluviales sometidos a la erosión lateral y de fondo del cauce, los aportes de sedimentos por inestabilidad de las bancas del cauce pueden ser significativas, de manera que adicional a los sedimentos producidos por la erosión superficial de la cuenca, en la estimación de la carga sólida se deben incluir potenciales volúmenes por falla de la banca.

En este proyecto el análisis de inestabilidad de las bancas se hizo con un método de equilibrio límite utilizando el software SLIDE. El análisis consistió en analizar la

estabilidad para una condición actual y posteriormente se evaluó el efecto de un aumento de la altura de la banca por socavación.

4.8.1 Cálculo de la profundidad de socavación en los puntos de interés

La ecuación con la cual se calcularon las profundidades de socavación, fue la ecuación de Inglis (1949), descrita a continuación:

$$D_s = 0.946 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} \quad [4-41]$$

Donde:

Q es el caudal (m^3/s)

D_s La profundidad de socavación (m)

Y $f = 1.76\sqrt{D_{50}}$, donde D_{50} es el diámetro medio de las partículas del lecho, tomado de la información granulométrica levantada en el Vertedero de El Delirio.

El diámetro medio encontrado en dicho punto, es de 7.35 mm.

4.8.2 Determinación del factor de seguridad

Para un sistema de fuerzas en equilibrio límite, la ecuación de equilibrio de momentos plantea que la sumatoria de momentos alrededor de un punto en el plano debe ser cero. Para superficies circulares, es bueno tomar el punto de referencia como el centro del círculo que define la superficie. Para el caso de superficies no circulares se puede tomar cualquier punto con algunas características convenientes de acuerdo con el problema, en este caso el punto se llama “centro ficticio”. La solución determina la movilización promedio de resistencia al corte que es requerida, a lo largo de la superficie de deslizamiento asumida, para dejar el talud en equilibrio límite. Sólo existe una superficie en la cual se moviliza totalmente la resistencia al corte, es decir el factor de seguridad se hace igual a 1.0. En el análisis se deben tener en cuenta las fuerzas causadas por las cargas externas al talud o por cuerpos de agua que actúan en él. Se puede considerar el efecto sísmico por medio de la inclusión en los cálculos de una aceleración horizontal K aplicada en el centro de cada tajada, a una distancia

k del centro de momentos, y que al ser multiplicada por su masa da como resultado la fuerza horizontal que afecta el equilibrio, Figura 4-43.

Resolviendo en sentido vertical para una tajada típica, se obtiene.

$$W - S_m \cdot \text{sen} \alpha - P \cdot \text{cos} \alpha - (X_l - X_r) = 0 \quad [4-42]$$

Donde la fuerza cortante S_m requerida para el equilibrio límite es una porción (1/FS) de la resistencia al corte disponible y es también función de la fuerza normal efectiva en la base ($P - u \cdot l$).

$$S_m = l \cdot \tau_{req} = \frac{[c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi']}{F} \quad [4-43]$$

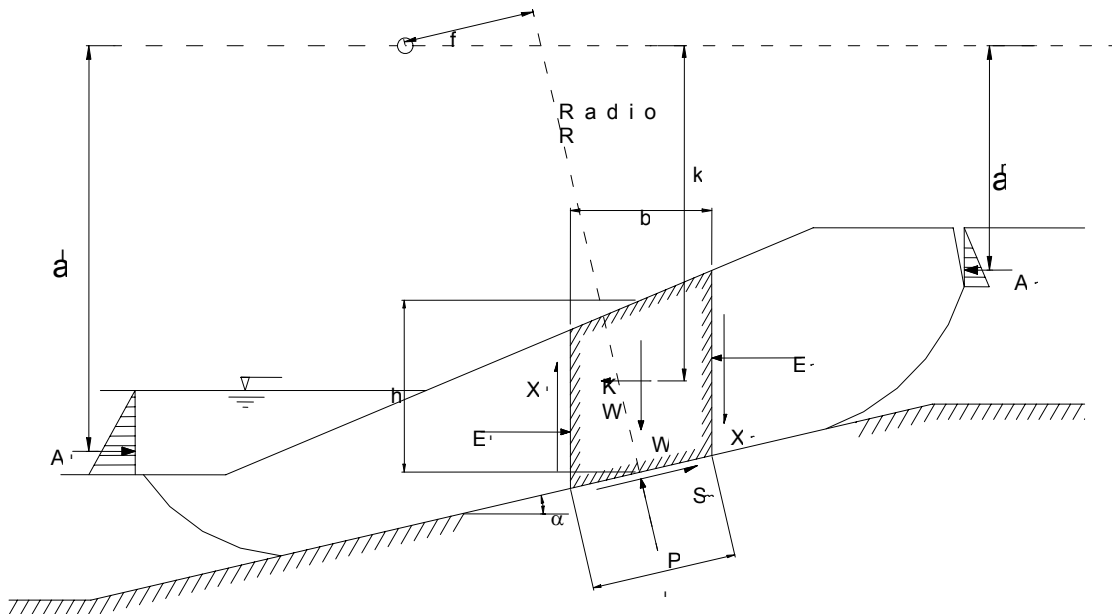


Figura 4-43. Parámetros Utilizados en el Planteamiento General de las Ecuaciones.

Sustituyendo S_m se tiene:

$$P = \frac{\left[W - \frac{c \cdot l \cdot \text{sen} \alpha}{F} + \frac{u \cdot l \cdot \tan \phi \cdot \text{sen} \alpha}{F} - (X_l - X_r) \right]}{m_\alpha} \quad [4-44]$$

donde:

$$m_\alpha = \left(\cos \alpha + \frac{\tan \phi \cdot \text{sen} \alpha}{F} \right) \quad [4-45]$$

Si se considera el talud completo, la suma de todas las fuerzas debe ser igual a cero, es decir:

$$\sum P \cdot \text{sen} \alpha - \sum S_m \cdot \cos \alpha + \sum KW + \sum (E_r - E_l) + (A_r - A_l) + L \cdot \cos w = 0 \quad [4-46]$$

Teniendo en cuenta que las fuerzas intertejadas son solamente internas:

$$\sum (E_r - E_l) = 0 \quad [4-47]$$

Sustituyendo S_m se obtiene el factor de seguridad en términos de fuerzas:

$$F_f = \frac{\sum [c \cdot l \cdot \cos \alpha + (P - u \cdot l) \cdot \tan \phi \cdot \text{sen} \alpha]}{\sum P \cdot \text{sen} \alpha + \sum K \cdot W + (A_r - A_l) + L \cdot \cos w} \quad [4-48]$$

Se debe recordar que con este análisis se supone un factor de seguridad constante a lo largo de la superficie de falla y que P depende del FS.

En forma similar, en el equilibrio límite, la suma de momentos alrededor del centro de momentos, de todas las fuerzas que actúan en el talud debe ser cero:

$$\sum W \cdot x + \sum K \cdot W \cdot k - (A_l a_l - A_r a_r) + L_j - \sum P \cdot f - \sum S_m \cdot R = 0 \quad [4-49]$$

Para el talud como un todo, la suma de momentos de las fuerzas internas E y x debe ser cero. Sustituyendo nuevamente S_m , el factor de seguridad con base en el equilibrio de momentos es:

$$F_m = \frac{\sum [c' \cdot l \cdot R + (P - u \cdot l) \cdot R \cdot \tan \phi']}{\sum W \cdot x + \sum K \cdot W \cdot k - (A_l a_l - A_r a_r) + L \cdot j - \sum P \cdot f} \quad [4-50]$$

Se debe tener en cuenta que R es constante sólo si la superficie de falla es circular. De nuevo P es función de F . Se asume que la solución más adecuada es aquella para la que los factores de seguridad son iguales:

$$F_f = F_m \quad [4-51]$$

4.9 Análisis de estabilidad de las laderas de la cuenca

Debido a que los procesos de inestabilidad predominantes en la cuenca de estudio son los movimientos trasnacionales que involucran parcial totalmente los depósitos coluviales y suelos residuales, el análisis de estabilidad de las laderas de la cuenca se basó en el equilibrio límite de superficies planares para los diferentes escenarios de lluvia y sismo.

En el caso de la lluvia, la respuesta hidrológica de la ladera se analizó siguiendo el proceso propuesto por Pradel y Raad (1993), por su parte los análisis bajo carga sísmica se hicieron con base en el modelo de bloque deslizante de Newmark (1965).

4.9.1 Determinación del nivel de agua

En las expresiones del Factor de seguridad, el término que define la presión de poros es función de la profundidad del nivel freático y del régimen de flujo que se presenta en el talud. Con el fin de determinar este nivel de agua se debe hacer un modelo de flujo de agua subsuperficial al nivel de la superficie potencial de falla de una ladera.

El cambio en el nivel freático se obtiene a partir de la ecuación de continuidad y de la ecuación de Darcy. En la Figura 4-44 se presenta un elemento diferencial de suelo a través del cual está fluyendo el agua, la ecuación de continuidad establece un balance de agua dentro del volumen de control considerando los caudales de ingreso y de salida, así como el volumen de agua acumulado dentro del elemento de suelo.

Los caudales de entrada y salida se pueden expresar como:

$$q_e = -k \frac{\partial h}{\partial x} \cdot dh \cdot dy \quad [4-52]$$

$$q_s = -k \left[\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] dh \cdot dy \quad [4-53]$$

donde k es la permeabilidad, y h la cabeza total.

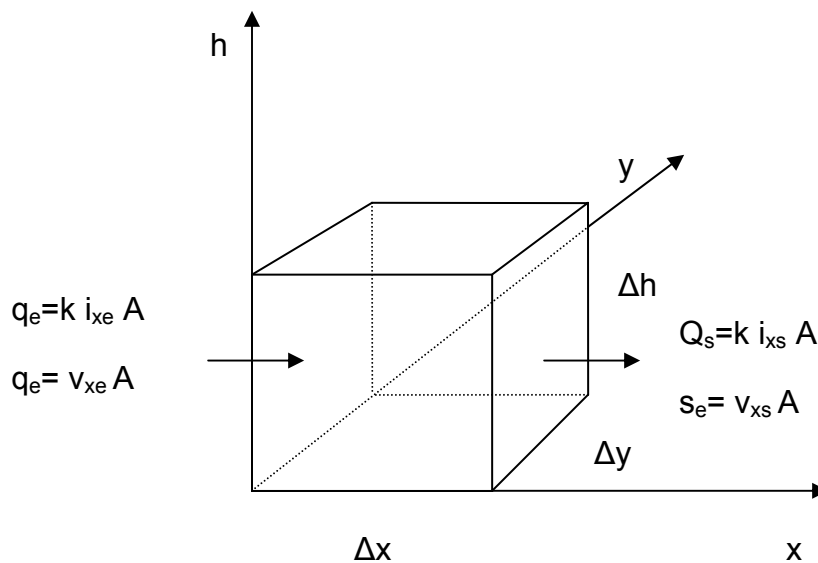


Figura 4-44. Volumen de control para determinar el volumen de agua acumulado dentro del suelo.

El volumen de agua acumulado por el flujo en dirección x está dado por:

$$q_x = q_{ex} - q_{sx} \quad [4-54]$$

$$q_x = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cdot dh \cdot dx \cdot dy \quad [4-55]$$

de igual forma se puede encontrar el volumen acumulado por el flujo en dirección y donde se obtiene que:

$$q_y = q_{ey} - q_{sy} \quad [4-56]$$

$$q_y = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dh \cdot dx \cdot dy \quad [4-57]$$

El cambio de volumen de agua en el elemento de suelo por el flujo en dirección x y se puede expresar como:

$$V_{wx} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cdot dh \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad [4-58]$$

$$V_{wy} = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dh \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad [4-59]$$

Si no hubiera flujo el volumen acumulado dentro del elemento de suelo sería:

$$V_{wa} = \lambda \cdot dh \cdot dx \cdot dy \quad [4-60]$$

donde λ es la porosidad del suelo.

El volumen de agua infiltrado debido a una lluvia continua de intensidad efectiva r está dado por:

$$V_{wi} = r \cdot dh \cdot dx \cdot dy \quad [4-61]$$

Finalmente el balance de volumen acumulado en el elemento de suelo se puede expresar como:

$$\lambda \frac{dh}{dt} - \frac{dq_x}{dx} - \frac{dq_y}{dy} = r \quad [4-62]$$

Solucionando esta expresión para h y expresando la solución en un esquema explícito de diferencias finitas, se obtiene:

$$h_{i,j,t+1} = h_{i,j,t} + \frac{r \cdot \Delta t}{\lambda} + \frac{k \cdot \Delta t}{\lambda \cdot \Delta x} \left[\frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta y} \cdot \frac{h_{i+1,j} + h_{i,j} - D_{i+1,j} - D_{i,j}}{2} - \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta y} \cdot \frac{h_{i,j} + h_{i-1,j} - D_{i,j} - D_{i-1,j}}{2} + \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta x} \cdot \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j} - D_{i,j+1} - D_{i,j}}{2} - \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{\Delta x} \cdot \frac{h_{i,j} + h_{i,j-1} - D_{i,j} - D_{i,j-1}}{2} \right] \quad [4-63]$$

donde D es el espesor del depósito de suelo.

4.9.2 Infiltración y avance del frente húmedo

Se ha encontrado que los deslizamientos superficiales, como los que se presentan en la cuenca de la Quebrada San Cristóbal, han mostrado ser inducidos por el incremento de la presión de poros en la parte superficial durante el proceso de infiltración y avance del frente húmedo, en el cual se genera una reducción en la succión y en algunos casos la presencia de niveles freáticos colgados, que pueden ser suficientes para inducir la falla.

Pradel & Raad (1993), han sugerido un método para estimar la profundidad de avance del frente húmedo basados en la ecuación de infiltración de Green & Ampt (1911), y Ng & Shi (1998) han sugerido que cuando se alcanza una profundidad crítica del avance del frente húmedo se puede generar la falla de la parte superficial del suelo.

La ecuación de Green & Ampt considera la intensidad y duración de la lluvia, el contenido volumétrico de humedad del suelo y la magnitud de la succión en el frente de avance. De acuerdo con el modelo, el tiempo necesario para saturar el suelo a una determinada profundidad es:

$$T = \frac{\mu}{k_s} \left[z_w + \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \quad [4-64]$$

Donde T es la duración de la lluvia, μ es la diferencia entre el contenido de agua volumétrico saturado y en condición natural, k_s es la permeabilidad saturada del suelo y z_w es la profundidad del frente húmedo por debajo de la superficie del terreno y ψ es el valor de la succión en el frente húmedo, definida como la presión negativa justo antes de que el suelo se satura. La magnitud de ψ depende del tipo de suelo, por ejemplo para suelos grueso puede ser del orden de 8 kPa, mientras que para suelos arcillosos puede ser del orden de 14 kPa.

La tasa de infiltración de la lluvia (v) se define como:

$$v = k_s \left(\frac{\psi + z_w}{z_w} \right) \quad [4-65]$$

De acuerdo con Pradel & Raad (1993), para que se produzca la saturación del suelo a la profundidad z_w , la intensidad de la lluvia (I) debe ser mayor o igual a la tasa de infiltración y la lluvia debe tener una duración mayor o igual a un valor mínimo. Combinando las dos expresiones anteriores se obtiene la siguiente relación, que establece la combinación de intensidades y duraciones capaces de producir la saturación del suelo a la profundidad z_w :

$$I_{\min} = \frac{\mu}{T_{\min}} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \left(\frac{z_w + \psi}{z_w} \right) \quad [4-66]$$

Donde I_{\min} y T_{\min} son la intensidad y duración mínimas requeridas para saturar el suelo hasta una profundidad z_w .

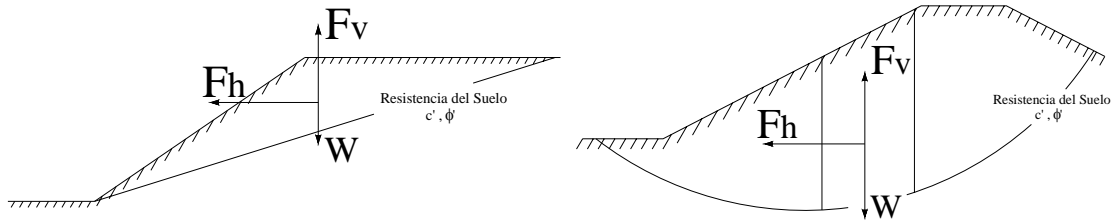
Relacionando la anterior expresión con las curvas I-D-F se puede establecer para cada escenario de análisis cual es la profundidad a la cual ha descendido el frente húmedo y asumir que hasta esa profundidad se presenta flujo paralelo a la superficie del terreno, esto es asumir un nivel freático colgado, y evaluar la estabilidad del terreno asumiendo un mecanismo de falla planar superficial.

4.9.3 Análisis pseudoestático

El análisis pseudoestático se empezó a utilizar desde 1920 para el análisis de estructuras de tierra sometidas a la acción de un sismo representado por fuerzas constantes horizontal y vertical. La primera aplicación explícita del análisis pseudoestático a la estabilidad de taludes se debe a Terzaghi en 1950.

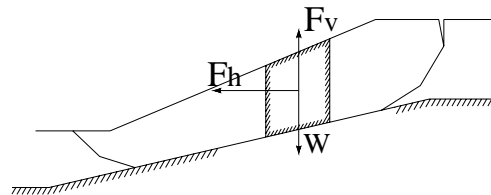
La forma más común del análisis pseudoestático corresponde a la representación de los efectos sísmicos por medio de aceleraciones pseudoestáticas horizontal y

vertical, que producen fuerzas inerciales F_h y F_v , que actúan en el centroide de la masa en falla (Figura 4-45).



a. Superficie Plana – Análisis de Bloque

b. Superficie circular – Método de Tajadas



c. Superficie compuesta - Método de Tajadas

Figura 4-45. Fuerzas pseudoestáticas actuando en masas con diferentes geometrías.

La magnitud de las fuerzas pseudoestáticas está dada por:

$$F_h = \frac{a_h \cdot W}{g} = k_h \cdot W \quad [4-67]$$

$$F_v = \frac{a_v \cdot W}{g} = k_v \cdot W \quad [4-68]$$

donde a_h y a_v son aceleraciones pseudoestáticas horizontal y vertical, k_h y k_v son coeficientes pseudoestáticos adimensionales horizontal y vertical y W es el peso de la masa potencialmente inestable.

La selección del coeficiente pseudoestático es el aspecto más importante de este tipo de análisis, debido a su influencia directa en el proceso matemático. El coeficiente controla la fuerza pseudoestática que actúa sobre la masa inestable, por lo que su valor debe estar relacionado con alguna medida de las amplitudes de la fuerza inercial inducida al terreno. El coeficiente se obtiene dividiendo la aceleración representativa del registro sísmico entre la aceleración de la gravedad. Si la masa deslizante fuera rígida la fuerza inercial sería el producto del coeficiente por el peso del material inestable, fuerza que alcanzaría su máximo valor cuando la aceleración alcanza su máxima amplitud. Teniendo en cuenta que la masa deslizante no es perfectamente rígida y que la aceleración pico (máxima amplitud) sólo se presenta durante un instante, el coeficiente pseudoestático utilizado en la práctica es usualmente menor que el obtenido con base en la aceleración máxima del registro de aceleraciones.

El uso del análisis pseudoestático se ha reducido debido a la poca fiabilidad con la que la fuerza pseudoestática representa los efectos que el sismo causa sobre el talud. No se puede tener en cuenta el efecto de todas las aceleraciones del registro sobre la masa inestable, tampoco la generación de presión de poros causada por las cargas cíclicas, ni los efectos que este mismo proceso tiene sobre la degradación de las propiedades geotécnicas de los materiales. A causa de estas razones no es posible asegurar que el factor de seguridad obtenido por medio de un análisis pseudoestático pueda tener la misma interpretación directa que el factor de seguridad estático, pudiendo haber taludes con factor de seguridad pseudoestático superior a 1.0 pero en estado de falla por alguno de los otros procesos internos mencionados.

4.9.4 Análisis de bloque deslizante – Newmark

El método de análisis pseudoestático, al igual que todos los métodos de equilibrio límite, proporciona un índice de estabilidad (factor de seguridad) pero no aporta información acerca de las deformaciones asociadas con la falla del talud. Puesto que la integridad de un talud después de un sismo está controlada por los niveles de deformación, aquellos métodos de análisis que predicen desplazamientos proporcionan indicadores más útiles sobre la estabilidad de taludes en condiciones dinámicas (Kramer, 1996).

Teniendo en cuenta que la aceleración inducida por un sismo varía con el tiempo, el factor de seguridad pseudoestático varía durante el transcurso del movimiento. Si las fuerzas de inercia actuantes sobre una superficie de falla potencial aumentan de manera que la fuerza total de empuje exceda a las fuerzas resistentes, el valor del factor de seguridad decrece haciéndose menor que 1.0.

Newmark (1965) consideró el comportamiento de un talud bajo tales condiciones. Cuando el factor de seguridad es menor que 1.0, la masa en falla potencial no permanecerá en equilibrio; en consecuencia la masa será acelerada por el desequilibrio de fuerzas. La situación resulta análoga al caso del bloque sobre un plano inclinado (Figura 4-46). Newmark utilizó esta analogía para desarrollar un método de predicción del desplazamiento de un talud sometido a movimiento.

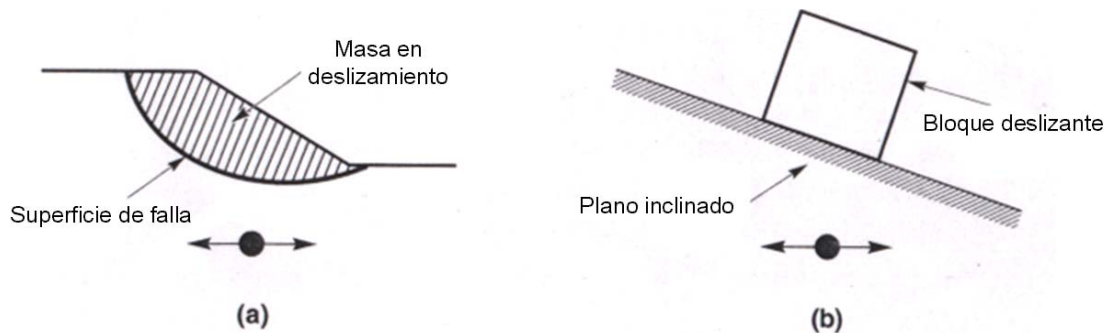


Figura 4-46. Analogía entre (a) deslizamiento de un talud y (b) bloque sobre un plano inclinado. Tomado de Kramer (1996).

Una de las claras explicaciones del método de Newmark es la presentada por Kramer (1996):

Considérese el bloque en equilibrio estático sobre el plano inclinado (Figura 4-47). Bajo condiciones estáticas, el equilibrio del bloque (en dirección paralela al plano) requiere que las fuerzas estáticas de resistencia disponibles R_s , excedan las fuerzas de empuje D_s (Figura 4-47a). Asumiendo que la resistencia al deslizamiento del bloque es netamente friccional ($c = 0$) donde ϕ es el ángulo de fricción entre el bloque y el plano.

$$FS = \frac{\text{fuerza resisitente disponible}}{\text{fuerza de empuje estático}} = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi}{W \sin \beta} = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad [4-69]$$

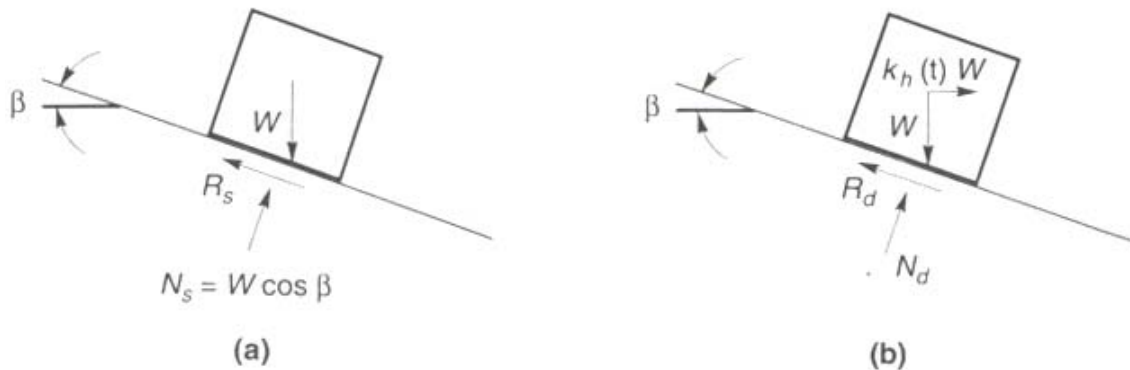


Figura 4-47. Fuerzas actuantes en un bloque sobre un plano inclinado. a. condición estática, b. condición dinámica. Tomado de Kramer (1996).

Ahora considérese el efecto de las fuerzas de inercia transmitidas al bloque por una vibración horizontal del plano inclinado con una aceleración $a_h(t) = k_h(t)g$ (los efectos de la aceleración vertical se ignoran por simplicidad). En un momento dado, la aceleración horizontal del bloque inducirá una fuerza horizontal de inercia $k_h W$ (Figura 4-47b). Resolviendo el sistema para las fuerzas perpendiculares al plano inclinado cuando la fuerza de inercia actúa en el sentido descendente del plano, se obtiene:

$$FS_d(t) = \frac{\text{fuerza resisistente disponible}}{\text{fuerza de empuje pseudo - estático}} = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \text{sen} \beta] \cdot \tan \phi}{\text{sen} \beta + k_h(t) \cdot \cos \beta} \quad [4-70]$$

El factor de seguridad dinámico decrece a medida que k_h se incrementa, y habrá algún valor positivo de k_h que producirá un factor de seguridad igual a 1.0 (Figura 4-48). Este coeficiente llamado coeficiente de aceleración crítica k_c , corresponde a la aceleración crítica $Ac = k_c g$. La aceleración crítica es la aceleración mínima requerida para producir la inestabilidad del bloque. Para el bloque de la Figura 4-47 se tiene,

$$Kc = \tan(\phi - \beta) \quad [4-71]$$

En caso de deslizamiento en el sentido descendente del plano. Si el deslizamiento es en el sentido ascendente del plano (el cual puede ocurrir cuando β y Φ son pequeños) se tiene,

$$k_c = \frac{\tan \phi + \tan \beta}{1 + \tan \phi \cdot \tan \beta} \quad [4-72]$$

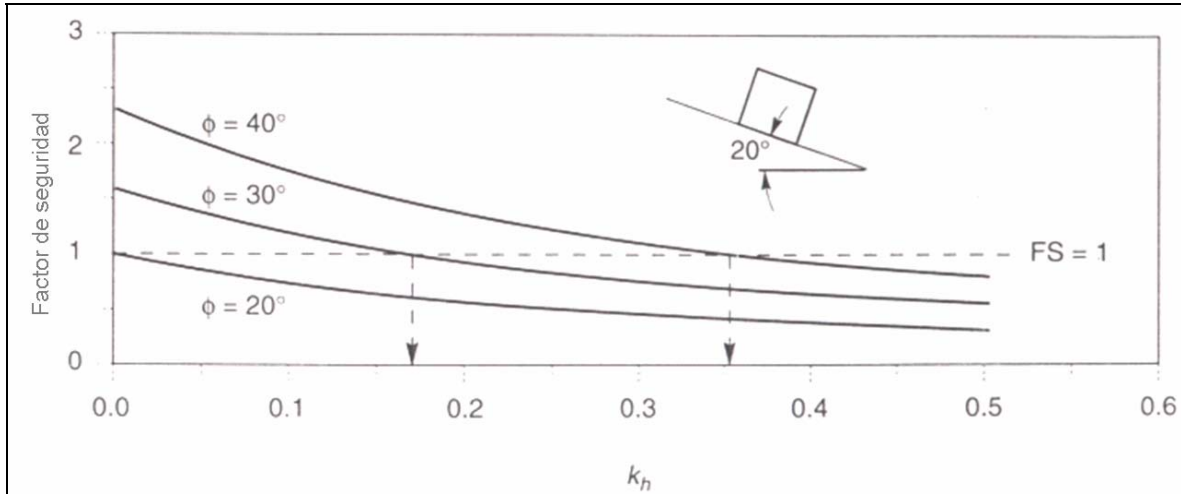


Figura 4-48. Variación del factor de seguridad pseudoestático con el coeficiente de aceleración horizontal K_h . Bloque sobre un plano inclinado a 20° . Para $\Phi = 20^\circ$, el bloque se encuentra en el punto de falla ($FS=1$) bajo condiciones estáticas, así que el coeficiente de aceleración crítica K_c es cero. Para $\Phi = 30^\circ$ y $\Phi = 40^\circ$ los valores de K_c son 0.17 y 0.36 respectivamente. Tomado de Kramer (1996).

Cuando un bloque sobre un plano inclinado se somete a un pulso de aceleración que excede la aceleración crítica, el bloque se moverá con relación al plano. Para ilustrar el proceso por el cual los desplazamientos permanentes resultantes pueden ser calculados, considérese el caso en el cual un plano inclinado es sometido a un pulso de aceleración sencillo de amplitud A y duración Δt . Si la aceleración crítica A_c (también denotada como A_y) es menor que A (Figura 4-47a), la aceleración del bloque con relación al plano durante el periodo de tiempo de t_0 a $t_0 + \Delta t$ es:

$$a_{rel}(t) = a_b(t) - a_y = A - a_y \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \quad [4-73]$$

Donde $a_b(t)$ es la aceleración del plano inclinado. El movimiento relativo del bloque durante este periodo puede ser obtenido integrando dos veces la aceleración relativa así:

$$v_{rel}(t) = \int_{t_0}^t a_{rel}(t) \cdot dt = [A - a_y](t - t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \quad [4-74]$$

$$d_{rel}(t) = \int_{t_0}^t v_{rel}(t) \cdot dt = \frac{1}{2}[A - a_y](t - t_0)^2 \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \quad [4-75]$$

Cuando $t = t_0 + \Delta t$, la velocidad relativa alcanza su valor máximo. En ese momento

$$v_{rel}(t_0 + \Delta t) = [A - a_y] \cdot \Delta t \quad [4-76]$$

$$d_{rel}(t_0 + \Delta t) = \frac{1}{2}[A - a_y] \cdot \Delta t^2 \quad [4-77]$$

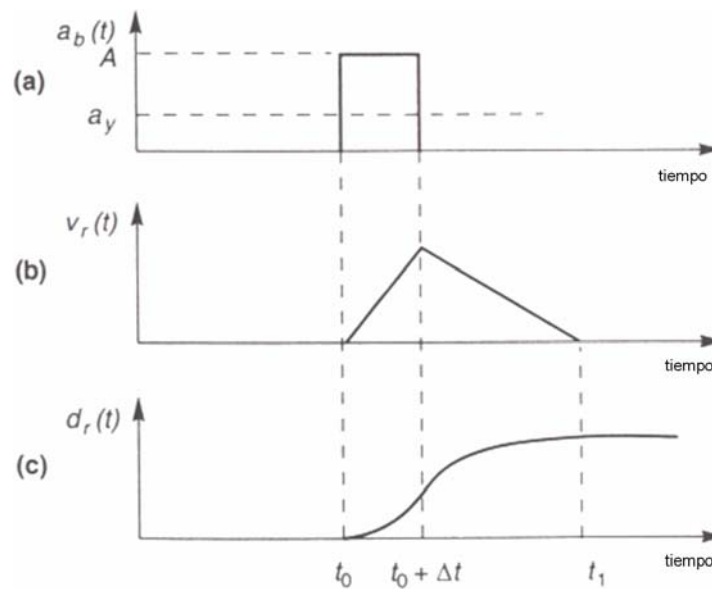


Figura 4-49. Variación de la velocidad y el desplazamiento relativos entre el bloque y el plano inclinado, debido a un pulso de aceleración que excede la aceleración crítica entre $t = t_0$ y $t = t_0 + \Delta t$. Tomado de Kramer (1996).

Después de que la aceleración base cae a cero (en el momento $t = t_o + \Delta t$), el deslizamiento del bloque es desacelerado por la fuerza de fricción actuante en su base. El bloque continuará desliziéndose sobre el plano, pero a una velocidad decreciente que eventualmente llegará a cero. La aceleración durante este momento está dada por:

$$a_{rel}(t) = a_b(t) - a_y = 0 - a_y = -a_y \quad t_o + \Delta t \leq t \leq t_1 \quad [4-78]$$

Donde t_1 es el momento en el que la velocidad relativa es cero (nótese que el bloque sufre una aceleración negativa, o desaceleración, durante este periodo). Durante $t_o + \Delta t$ y t_1 , la velocidad relativa decrecerá con el tiempo de acuerdo con:

$$v_{rel}(t) = v_{rel}(t_o + \Delta t) + \int_{t_o + \Delta t}^t a_{rel} \cdot dt = A \cdot \Delta t - a_y(t - t_o) \quad t_o + \Delta t \leq t \leq t_1 \quad [4-79]$$

Igualando la velocidad relativa a cero en $t = t_1$ se tiene

$$t_1 = t_o + \frac{A}{a_y} \cdot \Delta t \quad [4-80]$$

Entonces,

$$d_{rel}(t) = \int_{t_o + \Delta t}^t v_{rel}(t) \cdot dt = A \cdot \Delta t \cdot (t - t_o - \Delta t) - \frac{1}{2} [t^2 - (t_o + \Delta t)^2] \quad t_o + \Delta t \leq t \leq t_1 \quad [4-81]$$

Después del momento t_1 el bloque y el plano inclinado se mueven juntos. Durante el periodo total de tiempo entre $t = t_o$ y $t = t_1$, el movimiento relativo del bloque será como se muestra en la Figura 4-49. Entre t_o y $t_o + \Delta t$, la velocidad relativa se incrementa linealmente y el desplazamiento relativo se incrementa de manera cuadrática. En el momento $t_o + \Delta t$, la velocidad relativa ha alcanzado su máximo valor, después del cual decrece linealmente. El desplazamiento relativo continua incrementándose (pero a una tasa decreciente) hasta $t = t_1$. Nótese que el desplazamiento relativo total depende fuertemente de la magnitud y de la duración en tiempo durante la cual la aceleración crítica es excedida. Esto sugiere que el desplazamiento relativo causado por un pulso fuerte e individual de movimiento del

terreno debe estar relacionado con la amplitud y la frecuencia contenidas en dicho pulso. Un sismo, sin embargo, puede exceder la aceleración crítica cierto número de veces y producir cierto número de incrementos de desplazamiento (Figura 4-49). Entonces el desplazamiento total estará influenciado tanto por la duración del movimiento como por la amplitud y frecuencia presentes.

$$d_{rel}(t_1) = \frac{1}{2} (A - a_y) \cdot \Delta t^2 \cdot \frac{A}{a_y} \quad [4-82]$$

Kramer (1996) señala que el modelo del bloque deslizante predice que el desplazamiento permanente del talud será nulo si las aceleraciones inducidas por el sismo no exceden la aceleración crítica ($A/a_{max} \geq 1$). Ya que el desplazamiento permanente se obtiene por integración doble del exceso de aceleración, los desplazamientos calculados para un talud con una aceleración crítica relativamente baja (a_y/a_{max} pequeño) serán mayores que para aquellos taludes con una aceleración crítica mayor.

Usando la solución para el pulso rectangular desarrollado anteriormente, Newmark relacionó el desplazamiento con la velocidad pico base v_{max} así:

$$d_{rel} = \frac{v_{máx}^2}{2a_y} \left(\frac{1 - a_y}{A} \right) \quad [4-83]$$

La exactitud del análisis de bloque deslizante depende de la exactitud y confiabilidad del registro de movimiento del suelo utilizado en los cálculos. El método propuesto originalmente asume que la masa deslizante se comporta como un bloque rígido, por lo cual se debería tener en cuenta un registro sísmico tomado en la superficie de falla. Los análisis actuales, en algunos casos, consideran la deformación de la masa durante el deslizamiento análisis en los cuales es necesario considerar su geometría y rigidez así como la amplitud y el contenido frecuencial del movimiento del terreno bajo la masa deslizada.

La zonificación de amenaza de deslizamientos en la cuenca piloto se basa en los desplazamientos obtenidos utilizando el modelo del bloque deslizante de Newmark de acuerdo con los valores propuestos por Lin (1999) y presentados en la Tabla 4-11.

Estabilidad relativa basada en desplazamientos		
Estado de Falla	Descripción del daño	Desplazamientos permanentes (cm)
<i>Bajo</i>	<i>Movimiento insignificante del terreno, no existe aparente potencial de deslizamiento, efectos solo por vibración del terreno</i>	$D < 0.5$
<i>Moderado</i>	<i>Movimientos moderados del terreno, pequeñas grietas se forman comúnmente</i>	$0.5 \leq D \leq 5$
<i>Alto</i>	<i>Gran deformación del terreno, grietas moderadas y desplazamientos por deslizamiento.</i>	$5 \leq D \leq 50$
<i>Severo</i>	<i>Falla considerable del terreno, grandes grietas y desplazamientos por deslizamientos.</i>	$50 \leq D \leq 500$
<i>Catastrófico</i>	<i>Falla total, los deslizamientos se mueven grandes distancias llevando consigo todo lo que encuentran.</i>	$D > 500$
Estabilidad relativa en términos de la aceleración crítica		
Aceleración crítica	Nivel de estabilidad	
$0.7g \leq A_c$ $0.5g \leq A_c \leq 0.7g$ $0.3g \leq A_c \leq 0.5g$ $0.1g \leq A_c \leq 0.3g$ $0.01g \leq A_c \leq 0.1g$ $A_c \leq 0.01g$	<i>Muy estable</i> <i>Estable</i> <i>Alta</i> <i>Moderada</i> <i>Baja</i> <i>Inestable</i>	

Tabla 4-11. Niveles de amenaza y de estabilidad relativa con base en los desplazamientos y aceleraciones críticas propuestas por Legg et al., 1982 (Adaptado de Lin, 1990).

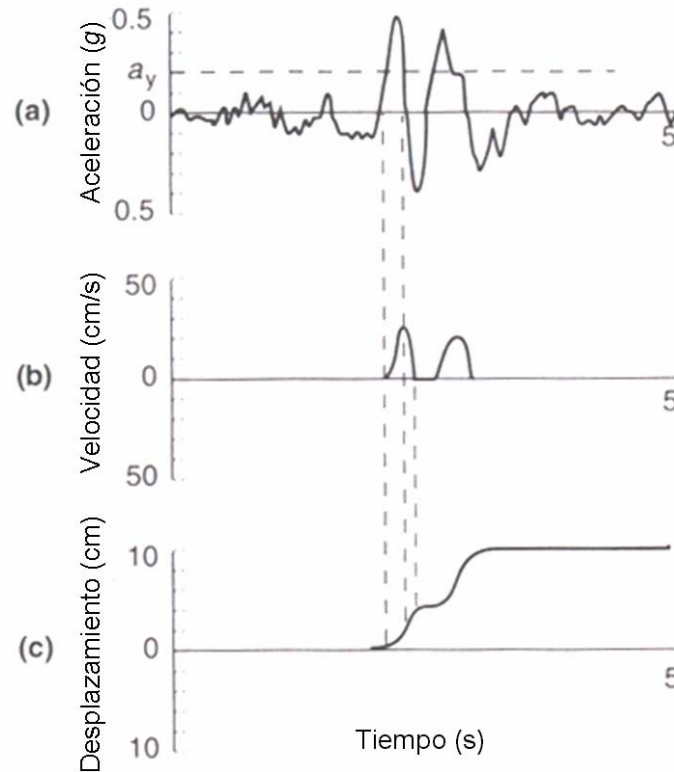


Figura 4-50. Desarrollo del desplazamiento permanente de un talud para un evento sísmico real. Tomado de (Wilson y Keefer, 1985).

4.10 Propagación de flujos

Para poder modelar la propagación de los flujos de lodo y de detritos, es necesario entender cómo es su comportamiento desde el punto de vista mecánico; dado que una de las mayores preocupaciones de los diferentes autores ha sido la de modelar el mecanismo de movilidad de los flujos de lodo; ya que todas las hipótesis intentan explicar cómo una mezcla con una concentración de sólidos tan alta puede adquirir la habilidad para moverse en pendientes muy inferiores a cualquier ángulo de fricción “razonablemente asumido”. La gran mayoría de autores hacen sus tratamientos analíticos, considerando que el comportamiento de la masa es el resultado de la acción conjunta de la resistencia al corte, según el concepto clásico de la mecánica de suelos, y componentes de viscosidad propias de un medio fluido.

En general los modelos de análisis aquí citados buscan representar mediante ecuaciones matemáticas, las características esfuerzo – deformación de los flujos de lodo y detritos, partiendo de consideraciones cualitativas, analíticas o experimentales, para cuantificar los parámetros dominantes en el comportamiento del proceso, y a partir de ellos, obtener estimativos de los factores de mayor importancia para el manejo, control y prevención de eventos de esta naturaleza.

Dependiendo de la concentración, tipo de sedimentos y distribución granulométrica de partículas, el comportamiento reológico de las mezclas agua – sedimentos puede ser Newtoniano o no Newtoniano. Un fluido Newtoniano presenta una relación lineal entre el esfuerzo de corte aplicado (τ) y la tasa de deformación angular (du/dz), la cual para flujo unidimensional puede ser expresada como:

$$\tau = \mu \, du/dz \quad [4-84]$$

Donde el coeficiente μ es la viscosidad del fluido, u es la velocidad, y z es la profundidad.

Las mezclas agua – sedimentos que presentan cantidades despreciables de limo y arcilla dispersas en la fase fluida, parecen mantener un comportamiento Newtoniano a muy altas concentraciones en volumen, tan grandes como 50%, para mezclas con partículas gruesas de tamaño relativamente uniforme, o tan grandes como 35% para sedimentos más uniformes.

Con el incremento en las cantidades de limo y arcilla, estas mezclas pueden adquirir cierta resistencia a la fluencia, mezclas que contienen predominantemente limo, logran dicha resistencia en un rango de concentración en volumen de 30 – 35%, y aquellas mezclas ricas en material arcilloso pueden exhibir resistencia a la fluencia a concentraciones en volumen tan bajas como el 10% o menos; la resistencia al corte de tales suspensiones de grano fino es proporcionada principalmente por fuerzas cohesivas (atracción electro – química entre partículas), en consecuencia la concentración para la cual un esfuerzo de cedencia aparece en la fase fluida es altamente dependiente de la distribución del tamaño de partículas de la mezcla (Pierson y Scott, 1985).

Modelo del fluido dilatante

Bagnold en 1954, Citado por Takahashi, (1991) consideró un fluido Newtoniano en un espacio anular entre dos cilindros coaxiales de los cuales se rotaba el exterior. Dentro de los cilindros se mezclaron partículas de cera de 0.132 cm de diámetro. Bagnold midió el exceso de presión con respecto a la hidrostática que actuaba sobre la pared del cilindro interno y determinó que este era proporcional al torque requerido para rotar el cilindro. Se consideró que el exceso de presión era

producido por la fuerza dispersante de la partícula resultado de la colisión permanente entre partículas, este proceso se denomina **presión dispersante**. Por otra parte, el torque debería estar relacionado directamente con el esfuerzo de corte producido en la mezcla de fluido y partículas dentro del espacio anular. De manera que se puede establecer la relación.

$$\tau = - P \tan \alpha \quad [4-85]$$

Donde τ es el esfuerzo de corte total en la mezcla. La constante de proporcionalidad en la ecuación anterior, esto es $\tan \alpha$, depende del número de Bagnold N, definido por él como:

$$N = \frac{\sigma \lambda^{1/2} d^2}{\mu_f} \left(\frac{du}{dz} \right) \quad [4-86]$$

Para $N < 40$, $\tan \alpha \approx 0.75$; para $N \geq 450$ cuando $\lambda < 12$, $\tan \alpha = 0.32$; cuando $\lambda > 12$, $\tan \alpha \approx 0.4$. En la ecuación d es el diámetro de la partícula, μ_f es la viscosidad del fluido intersticial, u es la velocidad de la mezcla, σ es la densidad de las partículas y λ es la concentración lineal de sólidos en la mezcla (relación entre el diámetro de las partículas y la separación radial media entre las mismas, expresada en términos de concentración en volumen) definida como:

$$\lambda = \left\{ \left(\frac{C^*}{C} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\}^{-1} \quad [4-87]$$

Donde C^* es la concentración máxima permisible de sólidos cuando están empaquetados; C es la concentración en volumen de sólidos en el flujo. El número de Bagnold es similar al número de Reynolds que representa la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa, y cuando $N > 450$ el flujo es completamente inercial, mientras que para $N < 40$ está en el rango macro viscoso. De sus experimentos Bagnold halló las siguientes expresiones semi-empíricas:

Para rango completamente inercial ($N > 450$)

$$\tau (\approx T) = a \operatorname{sen} \alpha \sigma \lambda^2 d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad [4-88]$$

Donde a es una constante numérica igual a 0.042 para $C < 0.81C^*$ (Takahashi, 1981), T es la componente en la dirección considerada del esfuerzo cortante interparticular.

Para rango macro viscoso ($N < 40$)

$$\tau = 2.25 \lambda^{3/2} \mu_f \frac{du}{dz} \quad [4-89]$$

En general, según los enfoques mostrados por Rodríguez (1997), para el fluido Newtoniano la relación entre T y $\left(\frac{du}{dz}\right)$ es lineal, mientras que para un fluido dilatante (tipo Bagnoldian), T es proporcional a $\left(\frac{du}{dz}\right)^2$.

Modelos reológicos plástico viscosos

La superficie de algunos flujos se muestran relativamente tranquilas y muy viscosas, y a veces se ven grandes bloques flotando sobre la superficie del lodo, para explicar esas características Johnson (Citado por Takahashi, 1981) en sus análisis iniciales propone un **Modelo Bingham Fluido-Plástico**, el cual describe y modela bien los flujos de lechadas arcillosas.

La relación esfuerzo – deformación en un fluido Bingham es:

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{du}{dz}\right) \quad [4-90]$$

Donde τ_y es la resistencia a la fluencia, a partir de la ecuación anterior se obtiene la siguiente fórmula para la distribución de velocidad para un canal abierto:

$$\frac{u_s - u}{u_s} = \left(1 - \frac{h}{H} \frac{z}{h}\right)^2 \quad [4-91]$$

Donde H es la altura desde el fondo del flujo al punto donde el esfuerzo cortante aplicado es igual a la resistencia a la fluencia. Como el esfuerzo de corte arriba de H es menor que τ_y , esta parte del flujo debería ser rígida como si fuera una balsa

sobre flujo laminar; esta parte es frecuentemente llamada el tapón “plug”; el espesor ($h - H$) es

$$(h - H) = \frac{\tau_y}{[\sigma C + (1 - C)\rho]g \text{ sen } \theta} \quad [4-92]$$

Cuando H es igual a h , el fluido es Newtoniano simple.

La velocidad media en la sección transversal es dada por:

$$U = \frac{(Hh^{-1})^2 [1 - H(3h)^{-1}]}{2\mu} [\sigma C + (1 - C)\rho]gh^2 \text{ sen } \theta \quad [4-93]$$

La predicción de la velocidad por este modelo requiere los valores de τ_y y de μ . Sin embargo el método para obtenerlos no ha sido propuesto, excepto para lechadas puramente arcillosas.

Es posible para un fluido Bingham fluir en un canal de muy baja inclinación, siempre y cuando h sea bastante grande; esto no está de acuerdo con lo que sucede realmente en el proceso. Para evitar esta contradicción Johnson propuso en 1970 su **Modelo Coulomb - Viscoso**, en el cual la relación esfuerzo deformación es:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi + \mu \left(\frac{du}{dz} \right) \quad [4-94]$$

Donde c es la cohesión y σ_n es el esfuerzo normal interno. En este modelo la resistencia a la fluencia es una función no sólo de las propiedades de los materiales sino también de la profundidad del flujo. En este caso nuevamente c y μ son desconocidos.

Takahashi, (1991) adopta en gran parte las ecuaciones derivadas por Bagnold, para describir el flujo de detritos, sin embargo hace una discrepancia entre los esfuerzos debido a la interacción de los sólidos granulares y los esfuerzos debido a la turbulencia en el fluido intersticial, los cuales él modela como un factor de corrección a la ecuación propuesta inicialmente por Bagnold.

$$\tau = [d^2 a \text{ sen } \alpha \lambda^2 + l^2 \rho]^* \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad [4-95]$$

En la cual ρ es la densidad del fluido, l es la longitud de la mezcla definida como:

$$l = \xi \frac{d}{\lambda} \quad [4-96]$$

Donde ξ es una constante para la cual Takahashi sugiere un valor de 2. Finalmente, Takahashi, (1991) sugiere que para un flujo de detritos turbulento, se debe adicionar un tercer término a la ecuación de Bagnold,

$$\tau = \left[d^2 a \operatorname{sen} \alpha \lambda^2 + l^2 \rho + \left(\frac{l_t}{d} \right)^2 \rho_d \right] * \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad [4-97]$$

En la cual ρ_d es la densidad de los detritos y l_t es la longitud de la mezcla, la cual es mucho más grande que la longitud de la mezcla para el fluido intersticial.

O' Brien and Julien (1985) prueban un **Modelo reológico Cuadrático** para flujos hiperconcentrados; allí se asume que la naturaleza no –newtoniana de los flujos de sedimentos es el resultado de varios procesos físicos entre los que se encuentran la naturaleza cohesiva de las partículas finas de sedimentos, los esfuerzos de corte viscosos, el esfuerzo de corte debido a la turbulencia y los esfuerzos dispersivos debido a la colisión de los clastos; el modelo propone la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} + \xi \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad [4-98]$$

Donde $\tau_y = \tau_{mc} + \tau_c \quad [4-99]$

Además $\xi = \rho_m l_m^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2 \quad [4-100]$

En las ecuaciones anteriores, η es la viscosidad dinámica de la mezcla; τ_c es la resistencia a la cedencia debido a la cohesión; τ_{mc} es la resistencia al corte Mohr – Coulomb donde $\tau_{mc} = p_s \tan \phi$, (p_s = es la presión intergranular, ϕ = ángulo de reposo del material); ξ es el coeficiente del esfuerzo cortante inercial el cual depende de la densidad de la mezcla; ρ_m , la longitud de la mezcla; l_m , el tamaño de

sedimentos; d_s , la concentración volumétrica de sedimentos; C , y ρ_s la densidad de la masa de sedimentos sólidos.

La longitud de la mezcla es usualmente dada como una función desde la distancia a una frontera y la constante de Von Karman κ ; como una primera aproximación, la longitud de la mezcla puede ser determinada por $l_m = \kappa h$; donde h es la profundidad del flujo y $\kappa = 0.4$. El coeficiente a_i es un parámetro altamente variable, sin embargo Takahashi sugiere un valor de 0.01. La concentración lineal de sedimentos λ , es igual en este caso a la concentración máxima de sedimentos $C^* \approx 0.615$

Otros autores como Coussot (1997) modelan el comportamiento de flujos de lodo (mud flows o muddy debris flow) cuya fracción arcillosa (tamaños $< 40\mu\text{m}$) sea mayor que el 10% los cuales consideran como suspensiones concentradas de lodo; suponiendo que en estas mezclas existe un esfuerzo de cedencia debido a la interacción entre partículas arcillosas y que presentan generalmente corte por ablandamiento (shear – thinning), Coussot conservó el **Modelo Herschel – Bulkley**, el cual está de acuerdo con sus medidas reométricas dentro de un rango grande de tasas de corte. En condiciones de corte simple, este modelo puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\tau = \tau_c + K\gamma^n \quad [4-101]$$

Donde

τ = esfuerzo de corte,

τ_c = esfuerzo de fluencia,

γ = tasa de corte,

K y n = parámetros del modelo reológico donde n se asume igual a 1/3, aunque no exista razón física o teórica que pueda explicar este valor.

Modelación y tránsito de flujos de lodo y detritos

El estudio y modelación de este tipo de movimientos son frecuentemente influenciados por la dificultad de observaciones directas, esto como resultado de múltiples factores tales como: la rapidez del evento o parte de él, los continuos cambios en las propiedades del material, características morfométricas a lo largo

de la trayectoria del flujo etc. La modelación de flujo de detritos, requiere un modelo reológico (o ecuación constitutiva) para mezclas de agua – sedimentos; como vimos en la sección anterior, se han desarrollado varios de estos modelos, relacionando esfuerzo, deformación y tiempo entre otras variables. Los modelos altamente teóricos a pesar de su validez general y aplicabilidad son muy complicados para ser útiles en la práctica, mientras que el uso de modelos semiempíricos más simples está limitado para un rango más estrecho de aplicaciones por la carencia de adaptabilidad. Por lo tanto la selección de un modelo reológico, aunque subjetivo, ha constituido uno de los temas importantes tratados en la modelación de flujos.

Los flujos de lodo y detritos exhiben un comportamiento no uniforme y no permanente durante su tránsito, adicionalmente son procesos cuyas características aleatorias en cuanto a su origen, puntos de carga de sedimentos, detención y/o depositación hacen que en su predicción se genere incertidumbre.

Para predecir la variación espacial de este tipo de procesos, es necesario correr un hidrograma de inundación; el tránsito del hidrograma dependerá de la evaluación precisa del volumen de agua aportado por la cuenca y los puntos donde haya aporte de sedimentos entre otros, al tratarse de mezclas de agua con sedimentos, la principal variable que afectará el hidrograma será la concentración de sedimentos.

Tal como lo cita O'Brien et.al. (1993), el desarrollo de modelos de tránsitos de flujos de lodos y detritos comenzó su evolución a partir de los años 80's del siglo pasado cuando De Leon y Jeppsoon (1982) modelaron un flujo laminar de agua, aumentando los factores de fricción; asumieron un flujo Newtoniano permanente y espacialmente variado pero la cesación del flujo no pudo predecirse. Schamber y MacArthur (1985) citados por O'Brien et.al.(1993), diseñaron un modelo de elementos finitos unidimensional para flujos de lodo usando un modelo reológico Bingham para evaluar los esfuerzos de corte en un fluido no – Newtoniano, desarrollando posteriormente el primer modelo bidimensional, el cual tenía un aplicabilidad muy limitada. Posteriormente un número de modelos bidimensionales hicieron su aparición, incluyendo el de Takahashi y Tsujimoto (1985) citados por O'Brien et.al.(1993), los cuales juntaron un modelo de fluido dilatante con el modelo de resistencia de Coulomb. Takahashi y Nakawaga (1989) citados por O'Brien et.al.(1993), modificaron el modelo del fluido dilatante para incluir la turbulencia. Han y Wang (1996) crearon un modelo de rompimiento de presa, usando el modelo Bingham para simular un flujo de detritos.

Durante el tránsito, el flujo cambia sus características tales como la velocidad, la descarga y la concentración de partículas los cuales pueden evaluarse empleando ecuaciones que gobiernen el movimiento en caso unidimensional o bidimensional.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento son la de la conservación de la masa, la de conservación del momentum y elevación del lecho. Algunos autores han propuesto modelos matemáticos de flujos de detritos basados en la conservación de la masa y momentum del flujo, pero solamente algunos de ellos toman en cuenta el proceso erosión / depositación y el comportamiento de diferentes clases de sedimentos en el flujo. Los modelos simulan condiciones de prueba para canales con geometría determinada (sección rectangular o trapezoidal). El fluido puede ser considerado alternativamente, como un fluido de una sola fase de densidad constante, o como una mezcla de dos fases con densidad variable (Brufau et, al.2000); esta suposición ejerce una influencia enorme en la elección del modelo reológico: La situación típica de un flujo de detritos deteniéndose donde la pendiente del canal decrece puede simularse, ya sea con un fluido de densidad constante o con una mezcla de densidad variable; en el primer caso el flujo de detritos se detiene solamente si el modelo reológico tiene en cuenta un esfuerzo de cedencia. De otro lado, en una mezcla de densidad variable, los sedimentos se detienen, aun cuando el fluido intersticial corra aguas abajo.

Un modelo con fluido de densidad constante, no puede simular los efectos de la separación de sedimentos, necesarios para reproducir esos eventos reales, en los cuales los sedimentos gruesos toman lugar en la parte superior de los conos aluviales, o como obstáculos cerca del lecho del río.

Para un fluido de densidad constante, diferentes modelos reológicos han sido adoptados en el pasado tales como el modelo tipo Bingham (Jan 1997, Jin and Fread 1997), modelo Herschel - Bulkley (Laigle and Coussot, 1997); Rickenmann y Koch (1997) probaron diferentes modelos reológicos, variando desde el Bingham hasta el fluido Newtoniano. De igual manera (Brufau et al, 2000) cita otros modelos reológicos usados por algunos investigadores tales como el modelo de esfuerzo cuadrático utilizado por O'brien en 1993, o el modelo reológico de Bagnold en el cual el esfuerzo de cedencia no está presente utilizado por Takahashi en 1985.

La modelación del fluido como una mezcla de dos fases supera las limitaciones enunciadas anteriormente. De nuevo algunas alternativas pueden ser encontradas en la literatura, por ejemplo: La hipótesis del fluido dilatante de Bagnold usada por (Takahashi, 1991), la ecuación tipo Chezy con valor constante del coeficiente de fricción (Hirano et al, 1997).

Los modelos matemáticos y numéricos de deslizamientos – flujo pueden ser clasificados en dos grupos principales:

- Comprende formulaciones totalmente 3D, en las cuales las ecuaciones de balance de masa y momentum lineal son resueltas para un dominio que cambia con el tiempo. La posición de la interfase entre el suelo y el aire es seguida usando técnicas especiales tales como el algoritmo MAC aplicado por Sousa y Blight (1991), o la función de Pseudoconcentración implementada en el modelo propuesto por Frenette et al. (1997). Esos modelos son costosos en cuanto a esfuerzo computacional, y por lo tanto su uso está limitado a casos en los cuales es necesario conocer una buena estructura del flujo.
- Si se hacen algunas hipótesis acerca de la estructura vertical del flujo, es posible integrar las ecuaciones de balance con la profundidad, llegando a las también llamadas *ecuaciones de profundidad – integrada*. Las ecuaciones pueden ser de nuevo simplificadas, integrándolas sobre una sección transversal arribando a sencillos modelos 1D.

A continuación se describe el modelo FLO 2D, que será aplicado para la zona piloto. Los otros modelos de flujo que han sido identificados hasta el momento se presentan en el Anexo A – 2.

Modelo Bi – dimensional para simulación de flujos de lodo e inundaciones de agua FLO – 2D (O'BRIEN et al, 1993)

El modelo de tránsito FLO-2D es un modelo bidimensional que sirve para delimitar zonas de inundación. Este modelo corre un hidrograma de inundación, conservando su volumen; al tiempo que predice el área de inundación, simula la atenuación de la onda de flujo; tiene la ventaja que puede simular flujos hiperconcentrados.

El modelo se basa en las ecuaciones de momentum y conservación de volumen para un fluido, resolviendo las ecuaciones constitutivas planteadas para flujos hiperconcentrados mediante un esquema de diferencias finitas; las cuales son función de parámetros como la concentración de sólidos y la viscosidad de la mezcla. El modelo tiene la ventaja de ser muy flexible, debido a la ecuación reológica empleada para describir el comportamiento de la mezcla, pues usa el modelo reológico cuadrático propuesto por O' Brien and Julián (1985), el cual como se mostró anteriormente tiene varias ventajas sobre los demás modelos reológicos. Lo anterior se sustenta en que investigaciones reológicas (Major and Pierson, 1990) muestran que las matrices de los flujos de lodo se comportan de distinta manera dependiendo de la tasa de corte y la concentración de sedimentos:

como fluidos tipo Bingham a altas concentraciones de sedimentos finos y bajas tasas de corte. A bajas concentraciones de sedimentos dominan los esfuerzos debido a la turbulencia; altas concentraciones de partículas gruesas combinadas con bajas concentraciones de partículas finas son requeridas para generar esfuerzos o presiones dispersivas. Se convierte entonces el modelo reológico cuadrático por sus características, en el más apropiado para describir el continuo de los diferentes regímenes de flujo desde el flujo viscoso hasta el turbulento/dispersivo.

La ventaja de este modelo se ve materializada en su versatilidad para transitar canales usando secciones transversales de área variable, predecir descarga sobre los márgenes del canal y simular una planicie de inundación sobre una topografía compleja.

En esta investigación, se utiliza el modelo de propagación FLO-2D para describir escenarios de amenaza, debido a sus ventajas y a la disponibilidad del programa; una descripción más detallada del modelo y las hipótesis que usa para modelar flujos hiperconcentrados se muestra a continuación.

- *Software FLO- 2D*

El programa FLO-2D simula un flujo sobre el terreno utilizando archivos de datos topográficos que pueden ser desarrollados a partir de un mapa base digitalizado; el paquete de software FLO-2D incluye un sistema para desarrollar mallas (GDS) programa que genera un sistema de malla sobre una configuración de puntos aleatorios del terreno, además interpola y asigna elevaciones a los elementos de la malla; un programa pre-procesador reformatea los datos topográficos dentro de un archivo que identifica elementos contiguos de malla. Otros archivos de datos incluyen aquellos asociados con varios procesos físicos tales como flujo en canales, lluvia e infiltración, y archivos que controlan la simulación. El usuario tiene control para la creación de los archivos de datos espaciales y temporales de salida; los resultados de FLO-2D incluyen archivos con la velocidad y profundidad del flujo los cuales pueden ser reimportados a un programa de dibujo asistido por computador CAD, el cual produce contornos de profundidad y velocidad de flujo. Adicionalmente el programa post-procesador MAPPER muestra gráficamente la salida de resultados, y sirve como asistente en su interpretación. Este proceso esencialmente esquematiza la delineación del escenario de amenaza por inundación ya sea por agua o por flujos hiperconcentrados.

El FLO-2D es un modelo de conservación de volumen simple. El modelo transita el volumen de flujo alrededor de una serie cuerpos de agua moviéndose sobre la superficie terrestre o a través de segmentos de corriente en canales. La

progresión de la onda de flujo es controlada por la topografía y la resistencia del flujo. La planicie de inundación en dos dimensiones se desarrolla mediante una integración numérica de las ecuaciones de movimiento y conservación de volumen del fluido tanto para flujo de agua o para un flujo de sedimentos hiperconcentrado.

- *Ecuaciones que gobiernan el flujo*

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \quad [4-102]$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad [4-103]$$

La ecuación general constitutiva del fluido incluye la ecuación de continuidad y la ecuación de movimiento bi-dimensional (ecuación de momentum de onda dinámica):

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad [4-104]$$

Donde h es la profundidad del flujo y V_x y V_y son las componentes de la velocidad a una profundidad media a lo largo de los ejes coordenados X y Y . Los excesos de intensidad de lluvia (i) pueden ser diferentes de cero sobre la superficie del flujo. Las componentes de la rugosidad del canal S_{fx} y S_{fy} se desarrollaron en función de la pendiente del canal S_{ox} y S_{oy} , el gradiente de presión y la aceleración local. La aproximación de una onda difusiva a la ecuación de movimiento se define despreciando la última de las tres componentes de aceleración. Una representación de la onda cinemática se obtiene a partir de la ecuación de momentum despreciando el término del gradiente de presión. Los usuarios de FLO-2D pueden seleccionar la onda difusiva y la onda totalmente dinámica de la ecuación de momentum.

La representación en dos-dimensiones de las ecuaciones de movimiento en FLO - 2D se define mejor como un modelo cuasi bi-dimensional, usando un sistema de malla de diferencias finitas de forma cuadrada. La ecuación de movimiento es solucionada mediante el cálculo de la velocidad media del flujo a través de los elementos de frontera de la malla en una dirección y para un tiempo determinado. Existen 8 direcciones potenciales de flujo: las cuatro direcciones cardinales (norte, este, sur y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, sureste, suroeste y noroeste). Cada velocidad calculada es esencialmente de naturaleza

unidimensional y se resuelve independientemente de las otras 7 direcciones. La presión individual, la fricción, las componentes de aceleración convectiva y local se mantienen en la ecuación de momentum.

La magnitud relativa de las componentes de aceleración para los términos de la pendiente del lecho y presión es importante. Henderson (1966) calculó la magnitud de los términos de la ecuación de de momentum para un canal aluvial escarpado y con hidrogramas de caída rápida, obteniendo los siguientes resultados:

	Pendiente del lecho	Gradiente de presión	Aceleración Convectiva	Aceleración Local
Término de la ecuación de momentum:	S_o	$\partial y / \partial x$	$V \partial V / g \partial x$	$\partial V / g \partial t$
Magnitud (ft/mi)	26	0.5	0.12 - 0.25	0.05

Tabla 4-12. *Términos de la ecuación de de momentum para un canal aluvial escarpado.*

Esta comparación de términos ilustra que en la mayor parte de taludes con pendiente fuerte, el uso de la onda cinemática es suficiente para modelar la progresión del flujo de onda y la contribución de los términos de la aceleración puede ser despreciada. La adición del término del gradiente de la presión para crear la ecuación difusiva realizará la simulación del flujo sobre la superficie del terreno con topografía compleja. La ecuación de onda difusiva con el gradiente de la presión se requiere si el sistema de la malla considerada tiene depresiones topográficas. Los esquemas numéricos explícitos para solucionar la ecuación de onda difusiva requieren generalmente laderas relativamente suaves. Las laderas planas pueden inducir a pasos de tiempo muy pequeños para alcanzar la estabilidad numérica. Los términos locales y convectivos de la aceleración son importantes para la solución del flujo del canal especialmente para las laderas planas, convexas o las laderas muy escarpadas.

Los criterios para seleccionar una ecuación de tránsito se dan en la siguiente cuadro, el cual es adaptado de (Corps of Engineers, Technical Engineering and Design Guidelines No. 19, 1997).

Guía para seleccionar un método de tránsito de inundación	
Procesos Físicos	Ecuación de Tránsito Recomendada
1. Conos aluviales escarpados, planicies de inundación	Onda Difusiva, Onda Cinemática
2. Planicies de inundación con pendiente suave, Flujos de sobrebanca	Onda Difusiva, Onda Cinemática

Guía para seleccionar un método de tránsito de inundación	
Procesos Físicos	Ecuación de Tránsito Recomendada
3. Pendientes de Lecho > 10 Pie/milla y $TS v/d > 171$	Onda Dinámica, Onda Difusiva, Onda Cinemática
4. Pendientes de Lecho ~ 2 to 10 Pie/milla y $TSv/d < 171$	Onda Dinámica, Onda Difusiva
5. Pendientes de Lecho < 2 Pie/milla y $TS (g/d)^{0.5} > 30$	Onda Dinámica, Onda Difusiva
6. Pendientes de Lecho < 2 Pie/milla y $TS (g/d)^{0.5} < 30$	Onda Dinámica

¹T = Tiempo de descarga pico en el hidrograma; S = Pendiente de Lecho; v = velocidad promedio de flujo; d = profundidad promedio de flujo; g = aceleración de la gravedad (32.2 ft/s²)

Tabla 4-13. *Criterios para seleccionar la Ecuación de Tránsito (Corps of Engineers, Technical Engineering and Design Guidelines No. 19, 1997).*

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y del momentum en el modelo de FLO-2D se soluciona con un esquema central de diferencias finitas. Este algoritmo explícito soluciona la ecuación de momentum para la velocidad del flujo a través del elemento de frontera de la grilla. En general los esquemas numéricos explícitos son simples de formular pero están limitados a pasos de tiempo pequeños por criterios de estabilidad estrictamente numéricos; siendo una limitante cuando se simulan condiciones complejas de flujo, ya que el tiempo requerido para el cálculo computacional puede ser grande.

El dominio de la solución es discretizado dentro de los elementos cuadrados de la grilla. El procedimiento de cómputo para flujos en la superficie del terreno implica el cálculo de la descarga a través de cada uno de los límites en los ocho sentidos de flujo potenciales. Cada cálculo hidráulico del elemento de la malla comienza con una estimación de la profundidad lineal de flujo en la frontera del elemento de la grilla; la profundidad de flujo estimada del límite es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de la malla que compartirán descarga de flujo en una de las ocho direcciones. Los otros parámetros hidráulicos también se introducen de manera promedio para calcular la velocidad del flujo incluyendo la resistencia del flujo (Valor n - Manning), el área del flujo, la pendiente, la elevación superficial del agua y el perímetro mojado.

La velocidad del flujo en la planicie de inundación en la frontera es la variable dependiente. FLO-2D soluciona la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica completa para calcular la velocidad. La ecuación de Manning se aplica en una dirección usando la diferencia media en la pendiente de la superficie del agua para calcular la velocidad. Si se selecciona la ecuación de onda difusiva, la velocidad entonces se calcula para los ocho sentidos de potenciales de flujo

para cada elemento de la grilla. Si se aplica la opción de onda dinámica completa de la ecuación de momentum, la velocidad de onda difusiva calculada es utilizada como la primera aproximación (velocidad de inicial) para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica utilizando el método de Newton–Raphson. El término de la aceleración local es la diferencia en la velocidad para la dirección de flujo dada sobre el paso de tiempo anterior. El término de aceleración convectiva se evalúa como la diferencia en la velocidad del flujo a través del elemento de la malla del paso de tiempo anterior. El término local de la aceleración ($1/g * \partial V / \partial t$) por ejemplo para el elemento 251 de la malla en la dirección Este se convierte en:

$$\Delta(V_t - V_{t-1})_{251} / (g * \Delta t) \quad [4-105]$$

Donde V_t es la velocidad en la dirección Este para el elemento 251 de la malla en un tiempo t , V_{t-1} es la velocidad en el paso de tiempo previo ($t-1$) en la dirección Este, Δt es el paso de tiempo en segundos, y g es la aceleración debido a la gravedad. Se puede hacer una construcción similar para el término convectivo de la aceleración.

La descarga a través del elemento de frontera de la malla se calcula multiplicando los tiempos de la velocidad por el área representativa del flujo. Después de que la descarga se calcule para las ocho direcciones, el cambio neto en la descarga (suma de la descarga en los ocho sentidos de flujo) en o fuera del elemento de la malla es multiplicado por el paso de tiempo, para determinar el cambio neto en el volumen del agua. Este cambio en volumen neto entonces es dividido por el área superficial disponible (almacenamiento) en el elemento de la grilla para obtener el aumento o la disminución de la profundidad de flujo para el paso de tiempo; para el caso del tránsito en un canal, la integración es llevada a cabo de la misma manera excepto que la profundidad del flujo es una función de la sección transversal del canal.

La clave para la eficiencia cuando se usan esquemas de diferencias finitas es el criterio numérico de estabilidad que limita la magnitud del paso de tiempo. FLO-2D tiene un paso de tiempo que varía dependiendo si el criterio de estabilidad numérica es excedido o no. El criterio de estabilidad numérica se chequea para todos los pasos de tiempo y en todos los elementos de la malla para asegurar que la solución del modelo converja y la solución sea estable. Si se excede el criterio de estabilidad numérica, el paso de tiempo es disminuido y todos los cálculos hidráulicos previos a ese paso de tiempo son descartados. El esquema de tránsito de inundación usado por FLO-2D procede sobre la base de que el paso de tiempo es lo suficientemente pequeño para asegurar la estabilidad numérica; al igual que la mayor parte de los esquemas explícitos, éste está sujeto a la condición Courant-Friedrich-Lewy (CFL) para estabilidad numérica, la cual relaciona la celeridad de la onda de flujo con el tiempo del modelo y los incrementos espaciales; FLO-2D usa

la condición CFL para planicies de inundación, tránsito de canales y calles. El paso de tiempo Δt está limitado por:

$$\Delta t = C \Delta x / (v + c) \quad [4-106]$$

donde:

C: número de Courant ($C \leq 1.0$)

Δx : ancho del elemento de la malla.

v: Velocidad promedio calculada en la sección transversal

c: Celeridad de la onda calculada

Mientras el coeficiente C puede variar entre 0.3 y 1.0, dependiendo del tipo de algoritmo explícito utilizado, un valor de 1.0 es empleado en el modelo FLO-2D para permitir que tenga el paso de tiempo más largo.

Los pasos de tiempo generalmente varían de 0.1 a 60 segundos; el modelo inicia con el paso de tiempo mínimo y se incrementa hasta que una de las tres condiciones de estabilidad numérica sea excedida, entonces el paso de tiempo es disminuido; si el criterio de estabilidad continua siendo excedido el paso de tiempo es disminuido hasta que su valor mínimo es alcanzado. Los pasos de tiempo son una función de la variación de la descarga para un elemento de la malla dado y su tamaño; así elementos pequeños en la malla con hidrogramas de pendiente fuerte y grandes descargas pico, requerirán pasos pequeños de tiempo, en general la precisión no se ve afectada si pasos pequeños de tiempo son usados, pero el tiempo del cálculo computacional puede ser muy largo si la malla utilizada es muy grande.

- *Simulación de flujos de lodos y detritos en FLO-2D*

Los flujos de lodos y detritos son referidos generalmente como flujos de sedimentos hiperconcentrados, se comportan como eventos de inundación no homogéneos, no Newtonianos y transitorios, cuyas propiedades del fluido cambian significativamente a medida que transitan ladera abajo por canales o a través de conos aluviales. El comportamiento de un flujo de lodo se puede asumir como una

función de las propiedades de la matriz del fluido, geometría del canal, pendiente y rugosidad; en este caso la matriz del fluido consiste de agua y sedimentos finos; cuando se presentan concentraciones suficientemente altas los sedimentos finos alteran las propiedades del fluido, incluyendo la viscosidad, densidad y esfuerzo de cedencia.

Hay varias relaciones importantes en cuanto a concentración de sedimentos las cuales ayudan a definir la naturaleza del flujo de sedimentos hiperconcentrados; esas relaciones involucran la concentración de sedimentos en volumen, en peso, la densidad de sedimentos y el factor volumétrico. Cuando examinamos parámetros relacionados con flujos de lodos, es importante identificar la concentración de sedimentos ya sea como una medida de peso o en volumen. La concentración de sedimentos en volumen C_v está dada por:

$C_v = \text{Volumen de sedimentos} / \text{Volumen de agua más sedimentos}$

C_v está relacionado con la concentración de sedimentos en peso C_w por:

$$C_v = C_w \gamma / \{ \gamma_s - C_w (\gamma_s - \gamma) \} \quad [4-107]$$

donde:

γ : es el peso específico del agua

γ_s : es el peso específico de los sedimentos.

La concentración de sedimentos también puede ser expresadas por partes por millón (ppm) dividiendo la concentración en peso por 10^6 , el peso específico de la mezcla de flujo de lodos γ_m es una función de la concentración de sedimentos en volumen:

$$\gamma_m = \gamma + C_v (\gamma_s - \gamma) \quad [4-108]$$

Igualmente la densidad de la mezcla de lodo ρ_m está dada por:

$$\rho_m = \rho + C_v (\rho_s - \rho) \quad [4-109]$$

y

$$\rho_m = \gamma_m / g \quad [4-110]$$

Donde g es la aceleración de la gravedad. Finalmente el volumen de la mezcla total de agua y sedimento en un fluido de lodos puede ser determinado multiplicando el volumen de agua por un factor volumétrico dado por:

$$BF = 1/(1 - C_v) \quad [4-111]$$

Estas relaciones básicas serán importantes cuando se analicen las simulaciones de flujo de lodos, la mayor parte de estudios de flujos de lodos requieren la estimación de la concentración de sedimentos en volumen y el factor volumétrico que describa la magnitud del evento.

Tal como se describió anteriormente, los flujos hiperconcentrados de sedimentos involucran la interacción compleja del fluido y los sedimentos, procesos que incluyen turbulencia, corte viscoso, intercambio de momentum entre partículas de sedimentos y fluidos y colisión de partículas de sedimentos. La cohesión en los sedimentos finos controla el comportamiento no newtoniano del fluido en la matriz, esta cohesión contribuye a que el esfuerzo de cedencia τ_y pueda ser excedido y permita iniciar el movimiento del fluido; combinando las componentes de esfuerzo viscoso y esfuerzo de cedencia, en este caso se usas un modelo reológico Bingham.

Para velocidades de corte mucho más grandes, tal como puede ocurrir sobre abanicos aluviales con pendiente fuerte, se pueden generar esfuerzos debido a la turbulencia, en este caso puede surgir una componente de esfuerzo cortante adicional, denominada esfuerzo dispersivo, por la colisión de partículas de sedimentos. El esfuerzo dispersivo surge cuando las partículas de sedimentos no cohesivas dominan el flujo y el porcentaje de sedimentos fijos cohesivos (limos y arcillas) es pequeño. Con el incremento de concentraciones altas de sedimentos finos la turbulencia del fluido y el impacto del fluido será suprimido y el flujo tenderá a ser laminar, por lo tanto la concentración de sedimentos en un evento de inundación dado puede variar dramáticamente y como resultado los esfuerzos viscosos y turbulentos pueden dominar alternadamente.

FLO-2D transita flujos de lodos como un fluido continuo prediciendo el movimiento de un fluido viscoso como una función de la concentración de sedimentos; utiliza el modelo reológico cuadrático descrito anteriormente, prediciendo la viscosidad y el esfuerzo de cedencia como una función de la concentración de sedimentos; como la concentración de sedimentos cambia para un elemento de la malla dado, se pueden modelar los efectos de disolución de un flujo de lodos y la removilización de depósitos.

Los dos primeros términos en el modelo reológico cuadrático, son referidos como los esfuerzos cortantes Bingham; la suma del esfuerzo de cedencia y el esfuerzo

viscoso define el esfuerzo cortante total de un flujo de lodos cohesivo en un régimen de flujo viscoso; la suma de los esfuerzos cortante turbulento y dispersivo define un régimen de flujo inercial para una inundación de lodos, este término es una función del cuadrado del gradiente de velocidad. Una discusión de estos esfuerzos y su papel en el flujo de sedimentos hiperconcentrado puede ser encontrado en Julien and O'Brien (1987, 1993).

Un modelo de flujo de lodos que incorpora solamente los esfuerzos Bingham e ignora los esfuerzos inerciales asume que el flujo de lodos simulado es viscoso, lo cual no es universalmente apropiado debido a que todas las inundaciones de lodos y algunos flujos de lodos son turbulentos con velocidades tan altas como 8 m/s aun flujos de lodos con concentraciones del 40% en volumen pueden ser turbulentos. Dependiendo de las propiedades de la matriz del fluido, la viscosidad y el esfuerzo de cedencia para concentraciones altas de sedimentos pueden aun ser relativamente pequeñas comparados con los esfuerzos turbulentos, si el flujo es controlado por los esfuerzos viscosos esto se reflejará en velocidades más bajas. Recíprocamente si la viscosidad y los esfuerzos de cedencia son más pequeños, los esfuerzos debidos a la turbulencia dominarán y las velocidades serán más altas.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad [4-112]$$

Para definir los términos de todos los esfuerzos de corte que son usados en el modelo FLO-2D la relación de esfuerzos cortantes es integrada con la profundidad y reescrita en la siguiente forma como una pendiente adimensional:

Donde la pendiente de fricción total S_f es la suma de la pendiente de cedencia S_y , la pendiente viscosa S_v , y la pendiente turbulenta-dispersiva S_{td} . Los términos de la pendiente viscosa y turbulento-dispersiva son escritos en términos de la velocidad promedio V ; luego la pendiente viscosa se escribe así:

$$S_v = \frac{K \eta}{8 \gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad [4-113]$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimentos. El parámetro de resistencia K para flujo laminar es igual a 24 para canales rectangulares y lisos, pero puede aumentar dependiendo de la rugosidad y de la geometría en la sección transversal. En el modelo FLO-2D el valor de K puede ser calculado automáticamente a partir del valor n de Manning.

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad [4-114]$$

La resistencia n_{td} de los componentes del esfuerzo cortante turbulento dispersivo son combinados dentro de un valor n equivalente de Manning para el flujo:

A muy altas concentraciones los esfuerzos dispersivos se originan a partir del contacto entre las partículas de sedimentos incrementando la resistencia al flujo n_{td} , transfiriendo más momento en la frontera; para estimar este incremento en la resistencia del flujo el valor convencional de resistencia al flujo turbulento n_t es incrementado por una función exponencial de la concentración de sedimentos C_v .

$$n_{td} = n_t b e^{m C_v} \quad [4-115]$$

Donde n_t es el valor n turbulento, b es un coeficiente (0.0538) y m es un exponente (6.0896); esta ecuación fue basada sobre un documento sin publicar escrita por Julien and O'Brien (1998) la cual relaciona la resistencia dispersiva y turbulenta en flujo de sedimentos hiperconcentrados como una función de la relación de la profundidad del flujo con el tamaño de los granos de los sedimentos.

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad [4-116]$$

Los componentes de la pendiente de fricción pueden ser combinados en la siguiente forma:

La solución de la ecuación cuadrática anterior, ha sido formulada en el modelo FLO-2D para estimar la velocidad que se usa en la ecuación de momentum; la velocidad estimada representa la velocidad del flujo calculada a través de cada elemento de la malla o del canal usando la profundidad promedio del flujo entre los elementos. Se pueden asumir valores razonables de K y valores de n de Manning para el canal y para el flujo sobre el terreno.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad [4-117]$$

El peso específico de la matriz γ_m , el esfuerzo de cedencia τ_y y la viscosidad η , varían principalmente con la concentración de sedimentos, por eso al menos que un análisis reológico del material in situ del flujo de lodos este disponible, las siguientes relaciones empíricas pueden ser utilizadas para calcular la viscosidad y el esfuerzo de cedencia.

y

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad [4-118]$$

Donde α y β son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio O'Brien and Julien (1988), valores típicos de estos factores se muestran en la Tabla 4-14. La viscosidad y el esfuerzo de cedencia se muestran como funciones de la concentración en volumen de sedimentos C_v de limos, arcillas y en algunos casos en arenas finas y no incluyen material clástico de mayor tamaño.

La viscosidad de la matriz del fluido es también una función del porcentaje de limos y arcillas y de la temperatura del fluido; flujos de lodo muy viscosos tienen altas concentraciones de sedimentos y por lo tanto altos esfuerzos de cedencia pudiéndose presentar como flujos laminares, aunque estos flujos en la naturaleza son extremadamente raros; flujos menos viscosos (inundaciones de lodos) son siempre turbulentos.

Para un evento de flujo de lodos, la concentración promedio de sedimentos, generalmente varía entre un 20% y un 35% en volumen con concentraciones pico aproximándose al 45%; grandes eventos de inundación tales como la inundación de 100 años pueden contener demasiada agua para producir un evento de flujos de lodos viscoso, lluvias más pequeñas como la de 10 o 25 años de periodo de retorno pueden tener una propensión más grande a crear flujos de lodos viscosos, la mayor parte de las cuencas con historias de eventos de flujos de lodos eventualmente desarrollarán un suministro de sedimentos en el lecho del canal de manera que aun para tormentas pequeñas pueden generar flujos de lodo. La mayor parte de los flujos de lodo tienen un patrón de evolución de inundación distinto, inicialmente fluye agua limpia la cual puede ser seguida por una onda frontal de lodos y detritos (40 a 50 % de concentración en volumen), cuando la descarga pico llega, la concentración promedio de sedimentos generalmente decrece hasta un rango del 30 a 40% en volumen; en la caída de la pendiente del hidrograma, una oleada de concentración de sedimentos más alta puede ocurrir.

ORIGEN	$\eta = \alpha E \beta CV$		$\tau_y = \alpha E \beta CV$	
	α	β	α	β
DATOS DE CAMPO				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relaciones disponibles en la literatura				
Iida (1938)*	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-
*Ver O'Brien (1986) para las referencias. Conversión: Esfuerzo de corte: 1 Pascal (PA) = 10 dynes/cm ² , Viscosidad: 1 PAs = 10 dynes-sec/cm ² = 10 poises				

Tabla 4-14. Esfuerzo de cedencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos.

4.11 Evaluación de amenaza

4.11.1 De deslizamientos

La predicción de la amenaza en áreas sujetas corrientemente a deslizamientos se ha basado, algunas veces, en asumir que los eventos amenazantes que han ocurrido en el pasado bajo diferentes condiciones pueden proveer información útil para la predicción de futuras ocurrencias. En consecuencia, el mapeo de estos eventos, y el entendimiento de los factores que influyen la estabilidad de la ladera son muy importantes en la zonificación de amenaza, Shuster (1996), Van Westen y Soeters (1996). Por lo tanto la estimación de la amenaza requiere de una aproximación juiciosa a eventos que lleva unido el estudio de factores muy interrelacionados; y en muchos casos de eventos encadenados. La manera de

entender sus relaciones es modelando los factores y su interacción como un sistema en donde el cambio o modificación de una variable actúa sobre las otras de una manera compleja.

La amenaza de deslizamientos es comúnmente mostrada sobre mapas que dibujan la distribución espacial en clases de amenaza o zonificación de amenaza de deslizamientos. La zonificación de amenaza de deslizamientos requiere de un detallado conocimiento de los procesos que han sido activos en un área y de los factores que han llevado a la ocurrencia del evento potencialmente dañino, este conocimiento es de considerado dominio de los científicos de la tierra, los análisis de amenaza requieren del tratamiento de datos concernientes a los factores detonantes y su probabilidad de ocurrencia tales como sismos o pluviosidad, o la aplicación de modelos complejos. En muchos casos, sin embargo, no hay relación clara entre estos factores y la ocurrencia de deslizamientos. Por consiguiente, en muchos mapas de amenaza la leyenda no da generalmente mas información que la susceptibilidad de ciertas áreas a deslizamientos o indicaciones cualitativas relativas de amenaza, tales como alta, media o baja.

La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un área depende de las condiciones locales básicas y también de la recurrencia de los factores detonantes, tales como la lluvia o sismos que corrientemente no han sido considerados. Los términos amenaza y susceptibilidad son usados como sinónimos frecuentemente (Shuster, 1996; Van Westen & Soeters, 1996).

Hacer consideraciones del tiempo de ocurrencia de la amenaza es más difícil que hacer una evaluación del grado de estabilidad de un talud, a causa de la precisión y calidad del conocimiento de los procesos de inestabilidad involucrados. La variación de parámetros locales puede crear una distribución irregular de los esfuerzos impuestos y de la resistencia al corte que puede no ser reflejado en los ensayos de laboratorio o en mediciones de campo. Además, no es siempre posible determinar la superficie de falla, sino, hasta después de iniciado el movimiento.

La zonificación por amenaza de deslizamientos se ha basado en unos principios básicos que portuló inicialmente Varnes (1984) y que fueron complementados por Guzzetti et al. (1999), estos principios básicos se resumen a continuación:

- El presente y el pasado son la clave del futuro

Este principio seguido y establecido para la geología, significa e indica que las fallas en taludes naturales en el futuro serán más comunes de presentarse en situaciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas que han llevado a fallas en el pasado. Tal que nosotros tenemos la capacidad para estimar el estilo,

frecuencia de ocurrencia, extensión, y consecuencias de las fallas que puedan ocurrir en el futuro, lo que no necesariamente significa que la ausencia de fallas pasadas o presentes indique que no ocurrirán fallas en el futuro. Sin embargo, nuevos cortes o rellenos u otras actividades humanas podrán alterar tanto la topografía natural como los mismos depósitos de deslizamientos, mostrados en los mapas de estabilidad de taludes como unidades litológicas distintas o como depósitos de deslizamientos. Para los mapas, se indica que las condiciones hidrológicas y las de susceptibilidad de deslizamientos de taludes se incrementa bastante. En esencia, el principio es aplicable sólo para las condiciones que han llevado a fallas en el pasado y que en el presente pueden identificarse en su grado, o magnitud y para aquellas que de cualquier forma continuarán o en los efectos del cambio o de las nuevas condiciones que puedan ser evaluadas.

- Los procesos amenazantes deben ser identificados, en conjunto con las principales causas de deslizamientos.

Las causas básicas de las inestabilidades de laderas, pueden ser bien conocidas de los múltiples casos estudiados de fallas específicas. Algunas son inherentes a la roca o suelo, en su composición o estructura; otras, tal como la inclinación de taludes poco modificados, en algunos casos son constantes y en otros variables, algunos son transitorios (vibraciones sísmicas) y otros son impuestos por nuevos eventos, tales como actividades de construcción. En un área dada, muchas de estas causas pueden ser reorganizadas, y sus efectos clasificados, analizados o ponderados; y ser mapeados y correlacionados con otros y con las fallas pasadas. El objeto o propósito debería siempre relacionar el desarrollo de un entendimiento del proceso involucrado, esto permite la predicción de susceptibilidad por extensión de la información puntual o de la información de sitio a áreas grandes.

- El grado de amenaza y la capacidad o influencia de los eventos naturales y antropogénicos pueden ser evaluados y estimados.

Los deslizamientos dejan rasgos morfológicos que se pueden identificar, clasificar y cartografiar. Cuando las condiciones y procesos que promueven inestabilidad pueden ser identificados, a menudo es posible estimar su contribución relativa y dar alguna medición cualitativa o semi-cuantitativa, sitio a sitio. Tal que un inventario o resumen del grado de amenaza potencial en aquellas áreas puede construirse, dependiendo del número de factores de falla presentes, su severidad, e interrelación. El procesamiento de datos en este estado, puede ir desde aquellos muy simples y de evaluaciones subjetivas hasta evaluaciones sofisticadas de un procesamiento intensivo y extensivo en bancos de datos, posible con el uso de computadoras modernas. Debería recordarse, sin embargo, que la exactitud global del mapeo para la amenaza por deslizamientos

de áreas se mantiene muy poco evaluada, y para sitios particulares es raramente posible predecir la localización el tiempo de una falla, ello es posible usando un mapeo detallado y un monitoreo muy próximo.

- Los deslizamientos son controlados por leyes mecánicas que se pueden determinar empíricamente, estadísticamente o de manera determinística. Los factores que determinan la ocurrencia de deslizamientos se pueden recolectar y utilizados para generar modelos de comportamiento.
- La ocurrencia de deslizamientos, en espacio y tiempo, se puede inferir de investigación heurística, calculado a partir de información ambiental, o inferido a través de modelación física.

Pueden ser reconocidas dos tipos de metodologías básicas, para el análisis de las condiciones del terreno que han llevado a la inestabilidad de taludes.

- El manejo de la *experiencia* para una aproximación de la geomorfología aplicada, por la cual los científicos de la tierra directamente evalúan el parentesco entre los deslizamientos y sus escenarios geológico-geomorfológicos, empleando observaciones directas durante unos levantamientos de campo de los muchos que sean posibles como tantos sitios de deslizamientos existan, esto es conocido como la técnica o metodología del *mapeo directo*. Esta técnica es basada en el inventario de procesos anteriores a partir de la observación y correlación de rasgos encontrados en el terreno con la ocurrencia de las inestabilidades.
- Lo opuesto es aquella basada en la *experiencia o heurística*, es la aproximación de la metodología del *mapeo indirecto*, que consiste en mapear un gran número de parámetros que se considera afectan la estabilidad de los potenciales deslizamientos y un análisis de los procesos y sus elementos para un análisis estadístico posterior, con todos estos posibles factores contribuyentes con respecto a la ocurrencia del fenómeno de inestabilidad, establecer los criterios para definir la escala de la amenaza. En esta forma la conexión o ligazón entre las condiciones del terreno y la ocurrencia de deslizamientos pueden ser identificadas; por observación de los procesos anteriores correlacionados a partir de inventarios. Esta técnica se basa en interpretaciones o relaciones entre los factores observados con respecto a los movimientos del terreno existentes.

Otra división usada de técnicas de evaluación para la amenaza de inestabilidad de taludes fue dada por Hartlen y Viberg (1988), Westen et al. (1996), quienes diferenciaron entre técnicas de evaluación de amenaza relativa y absoluta.

La técnica de evaluación de amenaza relativa diferencia la expectativa o probabilidad de ocurrencia de movimientos de masas para diferentes áreas sin dar valores exactos sobre un mapa. Los mapas de amenaza absolutos exhiben o dibujan un valor absoluto o numérico para la amenaza, tal como el factor de seguridad o la probabilidad de ocurrencia.

Las técnicas de evaluación de amenaza pueden también ser divididas en tres grandes grupos: Carrara (1983), Martlen y Viberg (1988); Van Westen Soeters, (1996), de la siguiente forma:

- White box model, basado sobre modelos físicos, modelos hidrogeológicos y de inestabilidad de taludes, también referidos como modelos determinísticos.
- Black box model, no basados sobre modelos físicos sino sobre análisis estadísticos.
- Grey box model; basados parcialmente sobre modelos físicos y parcialmente sobre estadísticas.

Lo relevante es que los modelos usados para evaluar la amenaza por deslizamiento usan el análisis estadístico de los datos disponibles, la instrumentación del terreno y cada técnica o avance científico que suceda y tenga aplicación en las investigaciones de deslizamientos; haciendo posible una combinación y aprovechamiento de varios métodos. Sin embargo una técnica hará uso de los avances de otra en caso de presentarse; es así como la utilización de la representación cartográfica de características del terreno (topografía y relieve), el mapeo de variables y atributos del terreno, los productos derivados de la aplicación de los sensores remotos y su interpretación, tales como las fotografías aéreas, es común a muchos de estos tipos de técnicas de representar y evaluar la amenaza de deslizamiento.

Muchas técnicas de evaluación de amenaza por movimientos de masas que han sido usadas hasta la fecha, usan combinaciones de parámetros que pueden ser cualitativos, con determinaciones dependientes de un agrupamiento de factores; o cuantitativos, con una asignación de valores en una escala ordinal o por intervalos para una categorización en cada mapa de factores, los factores de ponderación pueden incluirse en cualquiera de los métodos de análisis (Hansen, 1984).

Con base en los anteriores postulados se puede hacer una clasificación de los diferentes modelos de evaluación de amenaza. La primera clasificación formal fue presentada por Hansen (1984), la cual se reproduce en la Figura 4-51.

Posteriormente Van Westen y Soaters (1996), complementaron la clasificación de Hansen y la presentaron en forma tabulada.

Otros autores han presentado propuestas de clasificación pero en esencia la clasificación de Hansen está vigente. El TG4 del Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones presentó en 1997 un trabajo relacionado con la zonificación de amenazas de origen sísmico dentro de las cuales se incluyeron los deslizamientos en este caso de propuso una clasificación en Grupos Clase I, II y III en función de la escala de trabajo y le calidad y cantidad de información disponible. La Figura 4-52 muestra esquemáticamente esta clasificación.

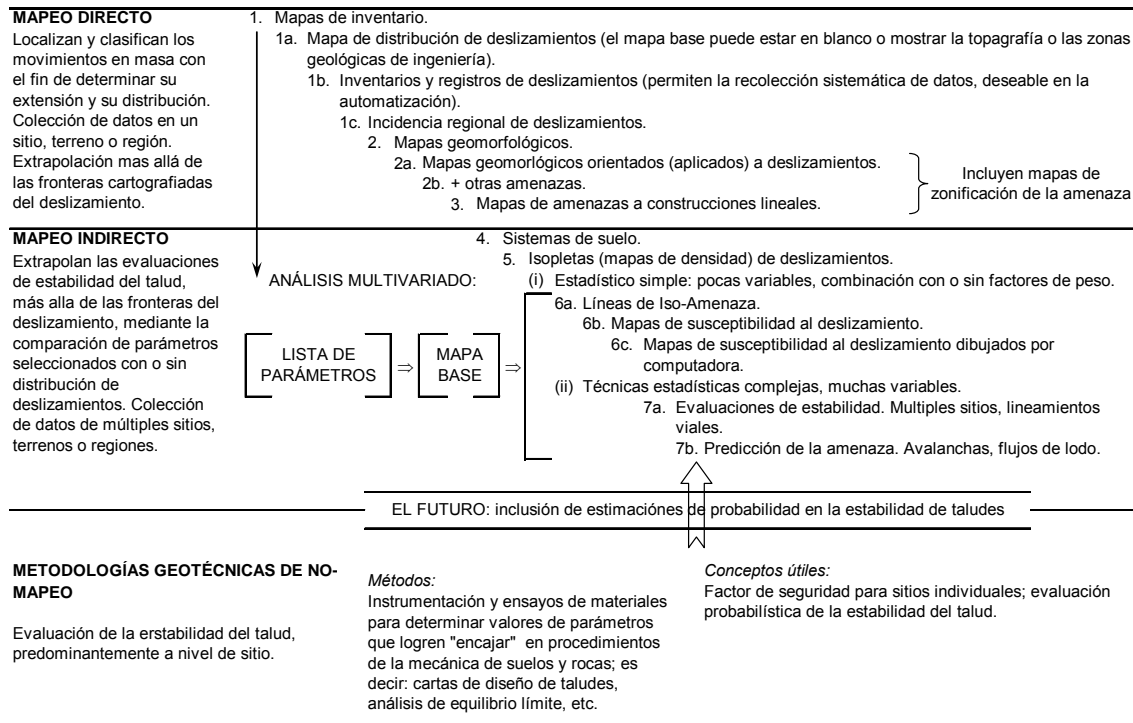


Figura 4-51. Clasificación de modelos de zonificación de amenaza según Hansen (1984).

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

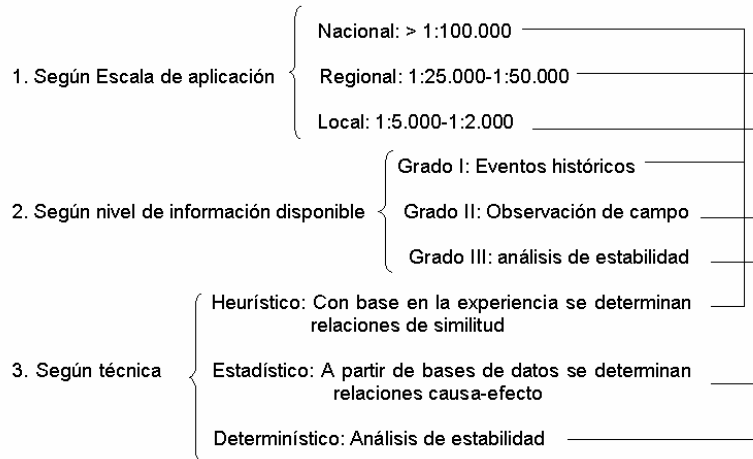


Figura 4-52. Clasificación de modelos de zonificación de amenaza de deslizamiento según escala de aplicación, información disponible y técnica usada.

Un inventario de técnicas de zonificación es presentado en el Anexo A –3, donde se presentan las fichas resumen de algunos de ellos. En estas fichas se identifican las ventajas, desventajas y aplicabilidad de cada uno de los métodos inventariados.

Con base en las anteriores referencias se puede hacer una clasificación genérica de modelos de zonificación de amenaza según el método y la técnica utilizada, de la siguiente forma:

1. Inventarios de deslizamientos (Mapeo Directo)

- Inventario de deslizamientos
- Análisis multi-temporales
- Mapas de densidades

2. Análisis heurístico (Mapeo Indirecto)

- Análisis geomorfológico
- Combinación cualitativa de mapas

3. Análisis estadísticos

- Análisis bivariados
- Análisis multivariados

4. Análisis de estabilidad

- Determinísticos
- Estocásticos

A continuación se describe de manera general cada uno de los métodos y técnicas aplicadas en zonificación de amenaza.

Inventario de deslizamientos. La más directa aproximación a la zonificación de amenaza (susceptibilidad) por deslizamiento es un Inventario de Deslizamientos, basado en fotointerpretación aérea, levantamientos de campo o base de datos de ocurrencias históricas de deslizamientos en el área.

El producto final muestra la distribución espacial de movimientos de masas, que puede ser representada sobre un mapa como área afectada o como símbolos puntuales (Wieczorek, 1984). Este tipo de técnica es útil para entender mecanismos y causas pero poco para predecir reactivaciones.

Los mapas de inventario de movimiento de masas son la base de muchas otras técnicas de zonificación de amenaza por deslizamientos. Pueden, sin embargo además ser usadas como una forma elemental de mapa de amenaza a causa de que delimitan la localización de tipos particulares de movimientos de taludes. Ellos sólo proveen información para los cortos períodos anteriores a la fecha en que las fotos aéreas fueron tomadas o en que el trabajo de campo fue conducido. Estos no muestran cambios temporales de la masa en movimiento, y muchos de los deslizamientos que ocurrieron mucho antes de que las fotografías fueran tomadas pueden haberse vuelto indetectables. Por lo tanto, la construcción refinada de un mapa de actividad de deslizamientos, debe basarse sobre una fotointerpretación aérea multitemporal (Canuti et al., 1979). Los mapas de actividad de deslizamientos son indispensables para el estudio de los efectos de variaciones temporales de un factor, tal como el del uso del suelo, sobre los deslizamientos (Van Westen y Soeters, 1996).

La distribución de deslizamientos puede además mostrarse en la forma de un mapa de densidades. Wrigt et al. (1974). presentan un método para calcular la densidad de deslizamientos usando un contador de círculos. El resultado de valores de densidad es luego interpolado y presentado por medio de líneas de igual densidad de deslizamientos “isopleths maps”. De hecho, los métodos de densidad no investigan las familiaridades o vínculos entre los

factores causantes y los movimientos de masas, sólo son usados cuantitativamente en la presentación de densidades de deslizamientos.

Estos métodos presentan las siguientes limitaciones:

- Es un inventario de depósitos no de sitios críticos.
- Se desconoce el momento en que se presentaron. De manera que no se puede estimar la recurrencia.
- No todos los procesos se originaron bajo el mismo escenario.
- No se tiene un parámetro para estimar la magnitud en términos cinemáticos.
- Las condiciones que generan una falla por primera vez no son las mismas que producen una reactivación.

Análisis heurístico. En el método de la aproximación heurística la opinión del geomorfológico “experto” que hace la inspección es usada para clasificar la amenaza. Los mapas por aproximación geomorfológica a la evaluación de amenaza por deslizamientos, centra su atención sobre la variabilidad espacial de la estabilidad de taludes.

Estos métodos combinan el mapeo de los movimientos de masas y sus escenarios geomorfológicos como los principales factores de alimentación de la determinación de amenaza.

Kienholz (1977) desarrolló un método hoy conocido también como el mapeo directo por *análisis geomorfológico*, en donde la amenaza es determinada directamente en el campo por el geomorfológico, el conocimiento del proceso es basado en la experiencia y en el uso del razonamiento por analogía. Las reglas de decisión son muy difíciles de establecer a causa de que ellas varían de lugar a lugar (Soeters & van Westen, 1996). Aunque existen ejemplos de aplicación de esta técnica, no se cuenta con una que sea reproducible en diferentes escenarios para generar mapas de evaluación de inestabilidad de laderas y ha sido tema de grandes o largos debates; de hecho hay varias escuelas de evaluación geomorfológica de amenazas, entre ellas la Francesa, el ITC de Holanda entre otras que han aprovechado los avances científicos y/o progresos de las otras escuelas o disciplinas para su uso en la geomorfología.

Para completar las experiencias de juicios aplicados al mapeo de inestabilidad de taludes, ha sido desarrollada una técnica basada en la *combinación cualitativa de mapas*, en ella los técnico- científicos de la tierra usan su conocimiento experto individual para asignar valores de ponderación a una serie de mapas de parámetros. Las condiciones del terreno de un gran número de localidades son resumidas de acuerdo a estos valores, llevados a un valor de amenaza que pueden ser agrupados en clases de amenaza. La combinación cualitativa de mapas se ha transformado en una técnica muy popular en zonificación de inestabilidad de taludes. El problema con este método es la determinación del valor exacto de ponderación de los varios parámetros de los mapas. Frecuentemente, un insuficiente conocimiento de los factores en el campo impide el apropiado establecimiento de los factores de ponderación, llevando a generalizaciones inaceptables.

Análisis estadísticos. En el análisis estadístico de amenaza por deslizamientos, la combinación de factores que han llevado a deslizamientos en el pasado es determinado estadísticamente, y predicciones cuantitativas son hechas para áreas actualmente libres de deslizamientos pero donde existen condiciones similares.

En el *análisis estadístico bivariado*, cada mapa de factores es combinado con el mapa de distribución de deslizamientos, y son calculados valores de ponderación basados en las densidades de deslizamientos para cada clase de parámetro. En términos generales se combinan dos parámetros y se clasifican en rangos de valores.

Una de las técnicas más utilizadas en este método es el uso del Valor de Información definido como:

$$I_i = \log \frac{S_i / N_i}{S / N} \quad [4-119]$$

donde,

I_i , es el valor de información de la variable i S_i , es el número o el área de elementos que presentan deslizamiento con la variable i , N_i , es el número o el área de todos los elementos que presentan la variable i . S , es el número total o el área total de los elementos en la zona de estudio que presentan deslizamientos, y N es el número o el área total de los elementos en el área de estudio.

El Valor de Información da un valor de peso para cada variable, de manera que la zonificación se puede hacer con la suma de todos los valores de peso de las

variables en la unidad de análisis, lo que se denomina el *Valor Total de Información*, dado por:

$$I_j = \sum_{i=1}^M X_{ij} I_i \quad [4-120]$$

donde,

X_{ij} , es 1 si la variable i existe en el elemento j , y 0 si la variable i no existe en el elemento j . M es el número de variables asociadas consideradas en el análisis.

La correlación entre una variable que defina el grado de estabilidad y cada una de las variables consideradas, también se ha empleado para zonificación de amenaza. En este caso se establece una relación lineal entre las variables de la forma:

$$\hat{y} = a + bx \quad [4-121]$$

donde y es la desviación estimada de Y correspondiente a cualquier desviación de X . En este caso b representa el coeficiente de regresión b .

El valor de regresión de ocurrencia de deslizamiento en el elemento j ($j=1, 2, \dots, N$) se expresa como:

$$R_j = \sum_{i=1}^M b_i X_{ij} \quad [4-122]$$

Un valor alto de R_j indica que en el elemento j se puede presentar deslizamiento.

Los métodos de los componentes principales y de correspondencia han sido utilizados para definir factores de peso para cada una de las variables y a sus categorías y a partir de esos pesos se determina un valor de peso total como la sumatoria de los pesos de las variables y de sus categorías, utilizando este valor para discriminar diferentes niveles de amenaza.

El análisis estadístico *multivariado* está basado en la recolección de grandes cantidades de datos con una buena calidad y busca que sus resultados no estén en definitiva variando según la experiencia profesional individual y selectiva de los investigadores. Los primeros esfuerzos realizados para obtener esta técnica fueron realizados en Italia por Carrara (1977), en su aplicación, todos los factores relevantes son muestreados sobre mallas o sobre unidades geomorfométricas. La matriz de resultado es luego analizada usando

regresiones múltiples y/o análisis discriminante, en donde se hace además necesario un despliegue de los métodos de análisis estadístico de datos.

Las técnicas estadísticas han sido usadas sobre datos cualitativos y cuantitativos relacionando las variables asociadas con deslizamientos y asistidas por los programas regionales de adquisición de datos, los cuales se analizan con modelos estadísticos. La técnica inicialmente se dirigió a determinar los taludes o las áreas donde la inestabilidad de taludes fuera más común, pero no daban las indicaciones del tiempo de ocurrencia de algún tipo de falla.

El inconveniente de los análisis estadísticos es que se requiere una variable dependiente que defina el nivel de amenaza y sirva para relacionar los demás parámetros. Usualmente los parámetros usados no tienen ningún significado físico y son simples valores obtenidos generalmente de manera algo arbitraria.

De manera genérica los modelos multivariados lineales se presentan de la forma:

$$L = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots + B_mX_m + \varepsilon \quad [4-123]$$

Donde L es la variable dependiente que define la amenaza, X_i son las variables independientes utilizadas para definir el modelo de predicción o de comportamiento, B_i son los coeficientes obtenidos a partir de la regresión múltiple.

Existen diferentes técnicas de regresión múltiple que han sido utilizadas en el análisis de amenaza por deslizamiento entre ellas se destacan los análisis multivariados discriminantes, los modelos logísticos y los modelos canónicos, entre otros. En los modelos discriminantes la variable L define si en el elemento de análisis existe o no deslizamiento.

Análisis de estabilidad. Además de los problemas relacionados con la recolección de datos suficientes y confiables, el uso de los modelos determinísticos se ha incrementado en análisis de amenaza para grandes áreas, especialmente con la ayuda de técnicas de información geográfica (SIG) que pueden manejar un gran número de datos y de cálculos involucrados en la determinación del factor de seguridad sobre grandes áreas. Los métodos determinísticos son aplicables sólo cuando las condiciones geomorfológicas y geológicas son más o menos homogéneas sobre el área entera de estudio y los tipos de deslizamientos son simples. La ventaja de estos modelos de caja blanca, es que ellos son basados sobre modelos de estabilidad de taludes y posibilitan la explicación de la inestabilidad que generan los movimientos de laderas, llevando al cálculo de valores cuantitativos de estabilidad, en términos del factor de seguridad, de la aceleración crítica o de los desplazamientos relativos obtenidos por el método de Newmark. El problema

con estos métodos es su alto grado de sobre-simplificación. Un método determinístico que es usualmente aplicado para deslizamientos traslacionales es el modelo del talud infinito. Estos métodos determinísticos generalmente requieren del uso de modelos de simulación del agua subterránea (Okimura y Kawatani, 1986).

Cuando se considera la incertidumbre en los parámetros del suelo o en las cargas o en ambos, se puede obtener la probabilidad de falla por medio de *modelos estocásticos*. Las principales técnicas utilizadas en este método son la Monte Carlo, el de Estimativos Puntuales y el de Doble Momento.

Para la zonificación regional de amenaza de deslizamiento dentro de la cuenca se van a utilizar los desplazamientos obtenidos con el método de Newmark, para lo cual se requiere de los factores de seguridad y la aceleración crítica del talud. En este caso se va a considerar un talud infinito para el cual se hará un análisis de respuesta hidrológica y la integración del registro de diseño que se adopte. A continuación se resume el marco teórico de los modelos a utilizar.

4.11.2 De flujos y avalanchas

Adentrando un poco más en el reconocimiento que se puede hacer a este tipo de procesos, aunque los flujos de lodo y de detritos causan estragos alrededor de todo el mundo, todavía permanecen pobremente entendidos, no obstante un conocimiento básico está disponible en lo que tiene que ver con su reconocimiento y propagación.

En el presente proyecto se hizo una revisión de diferentes modelos de evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados con inundaciones y flujos de detritos, los cuales se compilan en el Anexo A - 4, de los cuales se establecen las observaciones generales que se presentan a continuación.

Los modelos de evaluación de la amenaza por inundaciones y flujos usualmente se han basado en mapas de inundación asociados con diferentes periodos de retorno de las lluvias. De esta forma los análisis muestran la distribución espacial del flujo en términos de la profundidad de flujo y su velocidad, a partir de los cuales se evalúa la amenaza normalmente en tres niveles, siendo un nivel alto relacionado con profundidad y velocidad altas, un nivel medio con uno de esos valores bajo y esotro alto y un tercer nivel bajo en donde los dos factores son bajos.

Se encuentra una gran variedad de periodo de retorno para efectuar los análisis, siendo el más común el de 100 años. Con el fin de definir diferentes escenarios se

escoge un periodo de retorno de 10 años para un evento con alta probabilidad de ocurrencia, 100 años para uno de probabilidad media de ocurrencia y uno de 500 años para uno de baja probabilidad de ocurrencia.

Las magnitudes de la amenaza se definen con diferentes valores de los parámetros hidráulicos en particular la profundidad de flujo, su velocidad y el producto de estas dos. Los valores usualmente empleados de profundidad establecen límites en 0.5, 1.0 y 1.5 m; para velocidad se trabaja con 0.5, 1.0 y 1.5 m/s, mientras que para el producto de los dos se trabaja con 0.5, 1.0 y 1.5 m/s-m. Estos mismos valores se emplearon en el presente estudio para hacer un análisis de sensibilidad para definir cual se puede utilizar como nivel que discrimine diferentes escenarios de amenaza y riesgo.

La identificación de los factores o variables que inciden en la generación de flujos se han utilizado para aplicar modelos estadísticos multivariados, los cuales establecen una relación lineal entre un índice de amenaza (algunos lo denominan de riesgo) y las variables consideradas. Con la evaluación espacial de las variables utilizando SIG se determina la distribución espacial del índice calculado, a partir del cual se determina la amenaza, usualmente empleando funciones como el valor de información o análisis logísticos.

También se han aplicado métodos estocásticos para definir la probabilidad de ocurrencia de un evento de una magnitud definida, en este caso se asume que los eventos de inundación y flujo siguen una distribución exponencial. En este tipo de análisis es frecuente considerar como parámetro de magnitud el volumen de sedimentos, sin embargo presentan la dificultad en la definición de estos volúmenes en eventos pasados para obtener la función de probabilidad, por esto se han sugerido otras variables como la densidad de cárcavas como indicador.

En relación con la evaluación de la vulnerabilidad, ésta se ha definido cualitativamente a partir de indicadores. Algunos modelos discriminan la vulnerabilidad física, la social, la económica y la ambiental, los cuales se combinan para definir índices de vulnerabilidad normalizados.

La evaluación del riesgo ha sido de tipo semi-cuantitativo, en donde la amenaza se define numéricamente como probabilidad de ocurrencia del evento y la vulnerabilidad aunque expresada numéricamente se obtiene de manera cualitativa.

El riesgo se clasifica en tres niveles en función de los daños esperados, en este sentido se considera alto cuando se esperan daños estructurales y afectación sobre las personas por eventos de gran intensidad pero de baja probabilidad de ocurrencia. El nivel medio está definido para situaciones en que las edificaciones tienen una probabilidad media de ser afectadas estructuralmente de manera que las personas dentro de ellas no serán afectadas y los daños se limitan a las

personas que están fuera de las edificaciones. Finalmente el nivel bajo se define cuando no hay o es muy baja la probabilidad de falla estructural de la edificación y las personas no son afectadas, normalmente está asociada con eventos de magnitud baja.

4.12 Evaluación de la vulnerabilidad

4.12.1 Vulnerabilidad Física

El crecimiento desmedido de la población en zonas marginales, donde no hay ningún control en la forma en la que se construye, ni donde y como se construye, genera una situación de riesgo para las edificaciones; ya que la mayoría de estas construcciones se encuentran en zonas de ronda donde están altamente expuestos a fenómenos naturales, hidrometeorológicos, sísmicos o de otra naturaleza. Pero, ¿cuál es el significado de la vulnerabilidad?, al respecto hay muchas definiciones en las que se contempla desde implicaciones sociales hasta físicas.

El Instituto Simeón (Centro de Estudio para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos, 1998), define la vulnerabilidad como el punto hasta el cual una comunidad, estructura, servicio, o área geográfica serán probablemente dañadas o serán afectadas por el impacto de una amenaza particular, a causa de su naturaleza, construcción y proximidad a terreno peligroso o un área propensa a daños. Para propósitos de ingeniería, la vulnerabilidad es una función matemática definida como el grado de pérdida de un elemento dado ante amenaza. Es específico para cada tipo de estructura, y se expresa en una escala de 0 (ningún daño) a 1 (daño total). Para los propósitos socio-económicos más generales, la vulnerabilidad es un concepto con una definición menos estricta, incorpora las consideraciones del valor intrínseco de los elementos involucrados y su valor funcional contribuyendo en general al bienestar comunal y a la respuesta ante la emergencia y recuperación post-desastre. En muchos casos, es necesario, y suficiente, obtener una clasificación cualitativa por lo que se refiere a "alto", "medio", y "bajo".

Evaluación de vulnerabilidad física por flujos

En la evaluación de la vulnerabilidad por flujos la metodología más utilizada hasta el momento se basa en sistemas de información geográficos, los cuales tienen como base conceptos de expertos de evaluaciones post evento, como lo muestran Mustafa, Krong, entre otros.

En la evaluación determinista no son muchas las fuentes encontradas, al respecto Kelman comenta que a mediados de los 90's, Smith y el Cuerpo de Ingenieros de

los Estados Unidos (USACE) proponen funciones de Profundidad vs. Daño, como las mostradas en la Figura 4-53 para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones, y plantean como factores de influencia en esta evaluación: el tipo de flujo, velocidad, duración, contenido de sedimentos, frecuencia y características de la edificación.

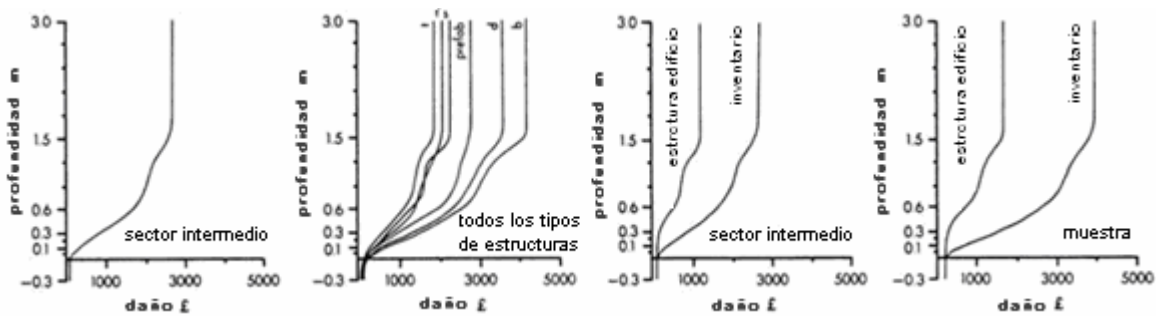


Figura 4-53. Ejemplos de las curvas Profundidad Vs. Daño. (Tomado de Kelman).

Según lo comentado por Kelman, posteriormente el Centro de Investigación de Amenazas por Inundaciones (FHRC) de la Universidad de Middlesex en Londres, presentó un trabajo en el cual estimó la vulnerabilidad de viviendas en términos monetarios, en el cual se presenta el daño económico como función de la altura de la lámina de agua que se encuentra en contacto con la vivienda. La primer publicación al respecto fue realizada por Penning-Rowsell and Chatterton en 1997.

En este mismo trabajo Kelman presenta su propuesta de evaluación de la vulnerabilidad física de residencias por flujos en zonas costeras, en la cual evalúa el daño en la estructura teniendo en cuenta la presión hidrostática impuesta por la diferencia de alturas entre el nivel de agua interno y externo de la vivienda (f_{diff}), la presión hidrodinámica impuesta por la velocidad del flujo, la erosión, el empuje, la acción de los sólidos suspendidos y la acción de agentes no físicos (agentes químicos, nucleares o biológicos), con lo cual también tiene en cuenta el daño de la estructura debido al contacto con el agua.

Kellman y Penning-Rowsell (2001) proponen algunas consideraciones a tener en cuenta en la evaluación del riesgo por flujos, ya que pueden aumentar el nivel de riesgo de los elementos expuestos, por ejemplo:

- Reducir las zonas de remanso y planicies que controlan el impacto del agua
- Acelerar las salidas de agua y direccionarlas rápidamente a los ríos lo que aumenta rápidamente los niveles de los ríos

- Velocidad de inundación, velocidades de flujo y duración del flujo.

En esta tesis se presenta:

- La importancia de la profundidad diferencial del flujo (f_{diff}) y la velocidad del flujo como causante de los daños en las residencias.
- Importancia de la falla estructural total de las residencias por el flujo.
- Importancia de evaluar la vulnerabilidad física de las residencias ante riesgo por flujo.

Este documento presenta los pasos detallados de la evaluación del riesgo por flujos, concentrando una especial atención en la evaluación de la vulnerabilidad de viviendas donde se enfoca de manera particular en la falla de muros y ventanas.

La evaluación se centra en el daño resultante de la presión hidrostática impuesta por la profundidad diferencial del flujo (comparando la lámina del flujo dentro y fuera de la vivienda) y la presión hidrodinámica impuesta por la velocidad del flujo. El daño debida al contacto con la lámina de agua (f).

Las matrices de vulnerabilidad sugieren un modo de falla para la vivienda tipo cuando f_{diff} es cercano a 0.5m y para una velocidad cercana a los 0.5m/s.

Como componentes de la vivienda se denominan pisos, puertas, paredes, ventanas, techos, azoteas y cada componente esta dividido en subcomponentes como marcos, vidrios, bisagras y cerraduras. El término "Residence" habla de cosas inanimadas como: muebles, juguetes, plantas. Sistemas hace referencia a cableado eléctrico, tubería de abastecimiento de agua potable, alcantarillado, líneas telefónicas, etc. Vehículos y otros accesorios como piscinas, jardines, etc.

La amenaza por flujo suele cuantificarse seleccionando un parámetro "medible" como la profundidad, la velocidad o la tasa máxima

Vulnerabilidad se refiere a las características de la sociedad e indica el potencial de daño que puede ocurrir como resultado de la amenaza. La vulnerabilidad según (Capobianco et al., 1999 y Klein & Nicholls, 1999) es función de:

- Resistencia: Habilidad de soportar cambios debidos a la amenaza
- Resiliencia: Habilidad de volver a su estado original después de ocurrido el evento
- Susceptibilidad: el estado actual, sin considerar cambios temporales.

Algunos de los parámetros que pueden ser cuantificables en la amenaza por flujos son:

- Volumen
- Profundidad
- Tasa volumétrica de flujo
- Temperatura
- Salinidad
- Densidad
- Porcentaje de sólidos por unidad de volumen
- Altura de onda, longitud y frecuencia.

Donde cada uno de estos parámetros es una función del espacio y del tiempo.

Cada impacto sobre las residencias es conocida como acción. El daño y las pérdidas sobre viviendas son categorizadas como:

- Directas, resultado del contacto del flujo de agua con la propiedad deteriorable
- Indirecto, resultado de la interrupción y entorpecimiento de las actividades económicas.
- Tangibles: Daño económicos fácilmente asignable
- Intangibles: Daños económicos difícilmente asignables

Como ejemplos de estas diferentes categorías tenemos:

- Directos – Tangibles: comida, colapso estructural

- Directos – Intangibles: Fotografías y negativos, heridas, sitios arqueológicos
- Indirectos – Tangibles: días de ausencia en el trabajo, cambios en los gastos familiares, inundaciones.
- Indirectos – Intangibles: Disminución de la calidad de vida debido al evento, retrasos en el sistema educativo.

Smith (1994), anota que la velocidad puede ser considerada en pocas ocasiones y genera la falla de la estructura.

USACE (1996), sugiere que la velocidad, duración, sedimentación, frecuencia, peligro del flujo y características de la construcción son factores de daño.

Flood Hazard Research Centre (FHRC), calcula curvas de daño económico como función de la altura de la lámina de agua. Su principal publicación al respecto, realizada por Penny-Rowell y Chatterton en 1977, sistematizó la evaluación de beneficios en el control de flujos para áreas residenciales y zonas de uso agrícola.

Para esta evaluación el sector residencial fue subdividido en 5 tipos de casa, cuatro edades diferentes, cuatro categorías sociales extraídas de seis clases sociales. Además se creó la categoría “prefabricado” que no tiene en cuenta edad ni clase social.

Curvas de daño en función de la profundidad, desarrolladas para:

- Ninguna evidencia de la inundación junto con señales de inundación de 0.5 h, 2 h, y 4 h
- Dos duraciones de los flujos arbitrarias, la más corta es inferior a 12 horas y la más larga es superior a 12 horas.

Las curvas para las viviendas son reportadas para cinco profundidades inferiores a la altura de la vivienda y una altura superior a la altura del piso.

Tomando este trabajo como base, el FHRC (Parker et al., 1987) continuó su trabajo incluyendo en su evaluación de beneficios en el control de flujos, los beneficios indirectos.

En 1992 Penning-Rowell et al., menciona el impacto de la velocidad en el daño por flujos, basado en las investigaciones de Clausen (1989). En su investigación, basado en datos empíricos obtenidos en la falla del dique Dale Dyke, Clausen concluye que:

- $v < 2 \text{ m/s}$ o $(f \times v) < 3 \text{ m}^2/\text{s}$ solamente se generan “Daños por inundación”
- $v > 2 \text{ m/s}$ y $3 \text{ m}^2/\text{s} < (f \times v) < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ generan “Daños parciales”
- $v > 2 \text{ m/s}$ y $(f \times v) > 7 \text{ m}^2/\text{s}$ generan “Destrucción Total”

Donde f hace referencia al punto de la profundidad del flujo en el que la velocidad es igual a la velocidad media en la dirección del flujo.

En 1998 USACE, propone diferentes parámetros a ser tenidos en cuenta en diferentes escenarios de daño, como se muestra a continuación:

f_{diff} : Superficial (<0,9m)
Moderado (0,9 – 1.8m)
Profundo (> 1,8m)

v : Lento (<0,9m)
Moderado (0,9 – 1.8m)
Rápido (> 1,8m)

Flujo repentino: Si (si es menor a 1 hora) / No

Hielo y detritos: Si / No

Ubicación del sitio: Costa / Rivera de un río

Tipo de suelo: Permeable o impermeable

Aunque la USACE muestra que muchas edificaciones con $f_{\text{diff}} > 0,9\text{m}$ pueden colapsar, esta misma entidad sugiere que las edificaciones deben diseñarse para

resistir tanto las cargas hidrostáticas como las fuerzas de flotación. La altura de $f_{diff} = 0,9m$ fue obtenida mediante análisis experimentales. Con respecto a las cargas de agua, USACE sugiere que las cargas hidrostáticas solo deben ser consideradas en el diseño para velocidades menores a 1.5m/s, ya que se convierte en algo económicamente ineficiente si la velocidad sobrepasa los 3m/s. Para velocidades menores a 3.0m/s, los efectos dinámicos del movimiento del agua pueden ser convertidos en cargas hidrostáticas equivalente con el aumento en la profundidad, proporcional a v^2 .

El trabajo Kelman, plantea las diferentes acciones que un flujo impone sobre una edificación, entre las cuales se destacan:

1. Acciones hidrostáticas:

Generadas por la presión lateral impuesta por la profundidad del flujo que rodea la vivienda o los componentes de la vivienda es:

$$\Delta P = \rho_w \times g \times (f_{diff} - y) \text{ donde } y = 0 - \rho_w g y \text{ para } b \leq y \leq f_{diff} \quad [4-124]$$

Además de esta acción también se considera como una acción hidrostática la Capilaridad ya que de ella depende el daño de los elementos existentes dentro de la casa y el daño de algunos elementos estructurales que estén fabricados con materiales retenedores de agua.

2. Acciones hidrodinámicas:

Las acciones contemplan cinco acciones, tres de ellas relacionadas con la velocidad (incluida la turbulencia) y dos relacionadas con las ondas.

La presión lateral impuesta por un flujo alrededor de una edificación, puede ser tomada como $\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2$. Este valor es la primera aproximación para representar la presión dinámica ejercida por un fluido.

Los cambios en la velocidad y las diferencias de presión, ocurren cuando el fluido se encuentra con las esquinas de la edificación, esto genera fenómenos de turbulencia que producen grandes impactos de manera local en la estructura.

La acción del oleaje (ondas suaves), puede simplemente aumentar o disminuir las presiones y las fuerzas totales impuestas en la vivienda en un 40%, lo cual depende del periodo de la onda. Respecto a la acción de las ondas de impacto, la función de presión se muestra en la Figura 4-54.

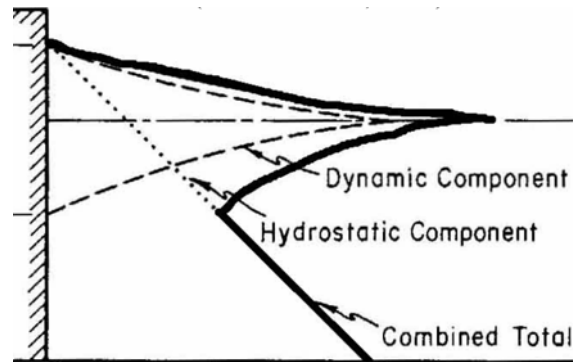


Figura 4-54. Función de presión para la acción de ondas de impacto (Tomado de USACE,1984).

3. Erosión:

El movimiento del agua puede causar erosión a lo largo de su viaje por lo cual se genera un alto transporte de sedimentos lo cual hace que el fluido cambie su densidad.

4. Fuerzas de Flotación:

Este tipo de fuerzas puede afectar completamente o parte de la residencia, depende de la densidad del flujo, y de las condiciones estructurales de la edificación.

La vulnerabilidad física de las personas debido a inundaciones no ha sido estudiada de manera sistemática, solamente se encuentran algunas tablas donde se sugieren algunos valores de vulnerabilidad, los cuales determinan la probabilidad de muerte si un flujo de ciertas características alcanza a una persona. Una forma de poder determinar este valor es contar con una base de datos de afectación a la población como una función de la magnitud de los flujos. Aunque esta no es tarea fácil es necesario implementarla para poder hacer análisis de riesgo social confiables.

Michael-Leiba et al. (2000) sugirieron que para flujos de detritos, personas localizadas en el ápice del flujo la vulnerabilidad física se podía tomar como 0.9, mientras que si ésta se encontraba en la zona de depósito el valor a utilizar sería de 0.05. Por su parte Finlay et al. (1999), proponen los valores que se presentan en la Tabla 4-15, las cuales son similares a los valores reportados por Wong et al (1997).

Descripción	Intervalo de valor de Vulnerabilidad	Valor recomendado
-------------	--------------------------------------	-------------------

Persona en espacio abierto enterrada por detritos	0.8-1.0	0.9
Persona en espacio abierto no enterrada	0.1-0.5	0.1
Persona en una estructura si la estructura colapsa	0.9-1.0	1.0
Persona en una estructura inundada por detritos que tapan a la persona	0.8-1.0	1.0
Persona en una estructura si los detritos sólo golpean la estructura	0-0.1	0.05

Tabla 4-15. Valores de vulnerabilidad física para personas debido a flujos de detritos (Adaptada de Michael.Leiba et al., 2000)

Moon et al. (1992) y Fell & Hartford (1997) presentan un cuadro de valores de vulnerabilidad física de personas como función de los parámetros hidráulicos del flujo, esta propuesta se presenta en la Tabla 4-16.

Zona de riesgo por flujo de detritos	Factores	Intensidad	Índice de vulnerabilidad estructuras	índice de vulnerabilidad personas
Extremadamente alta	Velocidad alta Profundidad alta	Muy alta	1.0	0.8
Alta	Velocidad alta-media Altura media	Alta	0.7	0.5
Media	Velocidad alta-baja Profundidad baja	Media	0.4	0.1
Baja	Velocidad media-baja Profundidad baja	Baja	0.1	0.01

Tabla 4-16. Índice de vulnerabilidad física de estructuras y personas por flujos de detritos (Adaptada de Fell y Hartford, 1997).

Desafortunadamente las categorías de factores hidráulicos incluidos en la Tabla 4-16 no están asociados con un valor numérico, de manera que el análisis se vuelve

subjetivo. Debido a que estos últimos valores son los únicos que se relacionan con la profundidad y velocidad de flujo, ellos fueron la base de los valores empíricos adoptados para el presente estudio como se presenta en el Capítulo 5- Metodología.

4.12.2 Vulnerabilidad Social

La metodología con la cual se desarrollará la evaluación de vulnerabilidad social se basó en la propuesta por Bollin and Hidajat, 2006, quienes presentan en su trabajo un resumen del método llamado Índice de Riesgo basado en la Comunidad (Community-based Risk Index) desarrollado por la GTZ de Alemania con el auspicio del Banco Interamericano de Desarrollo, el cual busca, además de hacer una evaluación del riesgo local, determinar las necesidades locales de una comunidad en riesgo. Otros modelos identificados en la revisión bibliográfica son presentados en el Anexo A – 5.

En este numeral se presenta el marco teórico del modelo original, las modificaciones propuesta e implementadas en este trabajo se exponen en el Capítulo 5- Metodología.

Los autores justifican el diseño de un modelo de evaluación de riesgo basado en la comunidad bajo el argumento que tradicionalmente el manejo del riesgo se ha basado en soluciones técnicas, con poco o ningún énfasis en lo social. En este sentido con base en la UN-International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) se requiere que la evaluación del riesgo y su manejo estén orientados hacia el desarrollo, lo que implica que debe incluir, además de lo técnico, factores sociales, económicos y ecológicos. La relación entre el riesgo y el desarrollo sostenible es considerada en el modelo propuesto.

El modelo está diseñado para reducir el riesgo local tomando en cuenta la vulnerabilidad y capacidades personales y de una comunidad, y el manejo del riesgo, bajo este enfoque, busca una mejora en la capacidad de toma de decisiones y participación de la comunidad afectada en alcanzar un desarrollo sostenible de manera que puedan compartir sus beneficios. Las ventajas de este tipo de modelos se resumen así:

- Las comunidades son reconocidas dentro de su propio ambiente. Ellas son ricas en experiencia en la forma como resisten las emergencias. Esta resistencia y sus métodos han evolucionado en el tiempo y han demostrado

ser la mejor estrategia desde el punto de vista económico, cultural y político a nivel local.

- Este método tiene la ventaja de que las comunidades se hacen menos dependientes en épocas de emergencia e incrementa su capacidad de soportar su propia subsistencia.
- Intervenciones con la participación de la comunidad tienen la ventaja de que incluyen aspectos socio-económicos. La participación de la comunidad le generará nuevos conocimientos y estrategias, así como mejora la capacidad de liderazgo de los miembros de la comunidad, y de esta manera fortalece su capacidad de contribuir al desarrollo de alternativas.
- Este tipo de modelo contribuye a reconocer las diferencias en vulnerabilidad y capacidad de respuesta en función del género, de manera que contribuye a la generación de equidad de género.

El modelo además de involucrar a la propia comunidad también lo hace con la administración local, lo que favorece la descentralización del poder y las responsabilidades. La administración local debe asumir la responsabilidad de suministrar los servicios básicos que generen el bienestar de la comunidad, y debe ser el responsable local del manejo del riesgo dentro del marco del desarrollo sostenible de la comunidad, esto genera el ambiente político y legislativo para que la comunidad se involucre en el manejo del riesgo.

El índice de Riesgo está basado en un sistema de indicadores que permite obtener información importante sobre las condiciones de riesgo e identifica los principales factores que la controlan con ayuda de la participación de la comunidad. El índice permite adicionalmente la comparación entre diferentes comunidades.

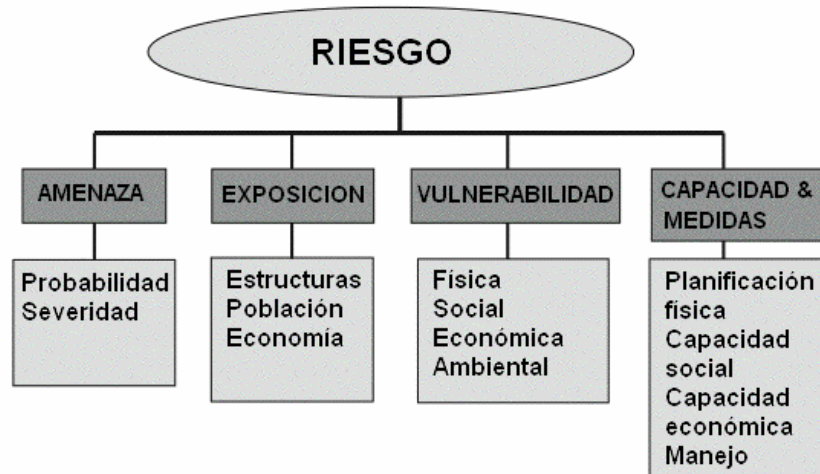


Figura 4-55. Marco conceptual para identificar el riesgo.

Marco conceptual

El modelo considera cuatro factores dentro de la evaluación del riesgo: Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad, Capacidad y Medidas, como se observa en la Figura 4-55. Para cada factor se definen unos elementos principales como se muestra en la Tabla 4-15.

Cada elemento es definido por una serie de indicadores como se presenta en la Tabla 4-15. En total se tienen 47 indicadores. Para cada indicador se deben definir tres niveles: alto/medio/bajo, esto permite que se puedan identificar los aspectos que necesitan ser reforzados a nivel local.

AMENAZA	EXPOSICIÓN	VULNERABILIDAD	CAPACIDAD Y MEDIDAS
Probabilidad Severidad (Magnitud)	Estructuras Población Economía	Física Social Económica Ambiental	Planeación Física Capacidad social Capacidad Económica Manejo

Tabla 4-15. Modelo de Indicadores.

El sistema de indicadores trae los siguientes beneficios:

- Mejora la capacidad de los tomadores de decisión, a nivel local y nacional, para medir los elementos fundamentales que condicionan el riesgo y la vulnerabilidad de comunidades.
- Suministra parámetros de comparación para monitorear cambios en el riesgo, como una medida para evaluar los efectos de las regulaciones e inversiones en el manejo del riesgo.
- Resalta las principales deficiencias para afrontar desastres naturales, por lo tanto indica los aspectos de posible intervención.
- Sistematiza y armoniza la presentación de información relacionada con el riesgo a nivel local.

El índice se determina asignando a cada categoría o nivel un número, de manera que a la clase baja se le asigna 1, a la media 2 y a la alta 3, como se observa en la Tabla 4-15., los factores de amenaza, exposición y vulnerabilidad están definidos en forma tal que un nivel alto representa una amenaza, exposición o vulnerabilidad alta, mientras que los de capacidad un valor alto representa una mejor condición. Un valor de "0" se usa a los factores que no son aplicables.

Debido a que cada elemento puede tener un significado diferente o una importancia diferente de acuerdo con el tipo de amenaza, se propone un factor de peso para el tipo de amenaza. Por ejemplo, un sistema de alerta temprana puede ser muy efectivo en el caso de flujos, sin embargo, en el caso de sismos este tipo de programas será inocuo. El peso indica la importancia relativa de cada indicador para el tipo de amenaza específica, y deben ser definidos de acuerdo con las condiciones del país.

Por aparte se deben definir pesos para cada uno de los factores, para los cuales se puede definir un índice aparte, que permite también la comparación entre ellos. De esta forma se tiene un Índice de Amenaza, uno de exposición, otro de Vulnerabilidad y finalmente uno de Capacidad. Dependiendo de los valores de los indicadores, el valor de cada índice va entre 0 y 100. En este trabajo se sugiere asignar un valor de peso igual para cada factor. El índice de riesgo es la suma de los índices de los factores, el cual también va entre 0 y 100, y se expresa de la siguiente forma:

$$R = (w_{HH} + w_{EE} + w_{VV}) - w_{CC} \quad [4-125]$$

donde R es el índice de riesgo total, H, E, V y C son los puntajes de los factores de amenaza, exposición, vulnerabilidad y capacidad, w es el factor de peso asignado a cada factor que para el caso se estableció en 0,33.

FACTOR Elemento	Nombre del Indicador	Indicador
AMENAZA Probabilidad Severidad	(H1) Ocurrencia (amenaza experimentada) (H2) Ocurrencia (amenaza potencial) (H3) Intensidad (amenaza experimentada) (H4) Intensidad (amenaza posible)	Frecuencia de eventos en los pasados 30 años Probabilidad de posibles eventos. Número posible por año Intensidad del peor evento en los pasados 30 años Intensidad esperada de eventos posibles
EXPOSICIÓN Estructuras Población Económica	(E1) Número de unidades de vivienda (E2) Líneas vitales (E3) Total de la población residente (E4) Producto Interno Bruto Local (PIB)	Número de unidades de vivienda (living quarters) % de casas con agua potable Total de la población residente Producto Interno Bruto Localmente generado en \$ corrientes
VULNERABILIDAD Física/demográfica Social Económica Ambiental	(V1) Densidad (V2) Presión demográfica (V3) Asentamientos inseguros (V4) Acceso a servicios básicos (V5) Nivel de pobreza (V6) Tasa de alfabetismo (V7) Actitud (V8) Descentralización (V9) Participación comunitaria (V10) Recursos locales (V11) Diversificación (V12) Negocios pequeños (V13) Accesibilidad (V14) Área bajo bosque (V15) Terreno degradado (V16) Terreno sobre utilizado	Habitantes/km ² Tasa de crecimiento de población Viviendas en zonas susceptibles a la amenaza (quebradas, bancas de los ríos, etc) % de viviendas con agua potable % de personas bajo el nivel de pobreza % de adultos que pueden leer y escribir Prioridad de la población para protegerse de la amenaza Porcentaje del presupuesto total auto-generado % de votantes que participaron en las +últimas elecciones comunales Presupuesto local total Mezcla de sectores económicos para empleo % de negocios con menos de 20 empleados Número de interrupciones de accesos viales en los últimos 30 años % de área de la comunidad cubierto por bosque % de área degradada/erosionada/desertificada % de terreno agrícola sobre utilizado
CAPACIDAD Y MEDIDAS Planeación física e ingeniería Capacidad social	(C1) Planeación del uso del suelo (C2) Códigos de construcción (C3) Reforzamiento/mantenimiento (C4) Estructuras preventivas (C5) Manejo ambiental (C6) Programas de alerta comunal (C7) Currículo escolar (C8) Simulacros de respuesta ante emergencias (C9) participación pública	Restricciones en uso del suelo o regulación Códigos de construcción aplicados Reforzamiento aplicado y mantenimiento regular Impacto esperado sobre las estructuras de control Medidas que promueven y fuerzan la conservación natural Frecuencia de programas de alerta comunal Objetivos de temas relevantes enseñados en el colegio Entrenamiento y simulacros de emergencia que se adelantan Comité de emergencia con representantes

FACTOR Elemento	Nombre del Indicador	Indicador
Capacidad económica	(C10) Manejo de riesgo local/grupos de emergencia	públicos Grado de organización de grupos locales
Manejo y capacidad institucional	(C11) Fondos locales para emergencias	Fondos locales para emergencia como % del presupuesto total
	(C12) Acceso a los fondos nacionales de emergencia	Periodo de desembolso de fondos nacionales
	(C13) Acceso a los fondos internacionales de emergencia	Acceso a fondos internacionales
	(C14) Mercado de pólizas	
	(C15) Préstamos para mitigación	Disponibilidad de seguros para edificaciones
	(C16) Préstamos de reconstrucción	Disponibilidad de préstamos para medidas de reducción de riesgo
	(C17) Obras públicas	Disponibilidad de créditos para reconstrucción
	(C18) Manejo del riesgo/comité de emergencia	Magnitud de los programas de obras públicas
	(C19) Mapa de riesgo	Frecuencia de reuniones del comité comunal
	(C20) Plan de emergencia	Disponibilidad y circulación de mapas de riesgo
	(C21) Sistema de alerta temprana	Disponibilidad y circulación de planes de emergencia
	(C22) Capacitación institucional	Efectividad del sistema de alerta temprana
	(C23) Comunicación	Frecuencia de entrenamiento de instituciones locales
		Frecuencia de contacto con instituciones del nivel nacional

Tabla 4-16. Indicadores de los diferentes elementos para el índice de Riesgo.

4.13 Cuantificación del riesgo

En el presente proyecto la estimación del riesgo se hizo de manera cuantitativa a partir de determinar las pérdidas anuales esperadas para diferentes magnitudes de amenaza. El riesgo económico se determinó como la afectación a las edificaciones y predios alcanzados por el flujo, mientras que el riesgo social se estimó con base en el número de personas potencialmente afectas al año por estos procesos.

4.13.1 Riesgo económico

Para calcular el riesgo económico se requiere de la identificación de todos los elementos expuesto en la zona potencialmente afectada por el flujo. Para cada tipo de elemento expuesto se debe evaluar el daño potencial a partir de la vulnerabilidad física de cada uno de ellos y se debe cuantificar su costo de reposición.

El riesgo se calcula con la expresión:

$$R = H \times V \times \$ \quad [4-126]$$

donde

H: es la probabilidad de ocurrencia anual de un flujo de una magnitud dada.

V: es la vulnerabilidad expresada como el porcentaje de daño esperado para esa magnitud de amenaza

\$: Costo de reposición de los elementos expuestos.

En estos términos el riesgo representa las pérdidas anuales por flujos.

4.13.2 Riesgo social

Con el fin de separar los efectos económicos de la afectación a la población es recomendable evaluar el riesgo social en términos de potencial de personas afectas o el número anual de muertes esperadas por inundaciones y flujos. El riesgo evaluado de esta forma es muy sensible a la concentración de personas en el predio. Tal como ocurrió en el presente estudio los datos de población no estaban bien discriminados por predio y la densidad de población promedio arrojada por el censo de 2005 da valores exageradamente altos, por lo que los resultados hay que mirarlos con un poco de recelo.

El valor de la vulnerabilidad física de las personas se puede combinar con la vulnerabilidad social con el fin de considerar las condiciones de la comunidad en la extensión de los daños potenciales.

El riesgo social se calculó en el presente trabajo como:

$$R = H \times V \times N \quad [4-127]$$

donde

H: es la probabilidad de ocurrencia anual de un flujo de una magnitud dada.

V: es la vulnerabilidad expresada como el porcentaje de daño esperado para esa magnitud de amenaza y calculada como:

$$V = [0.5(V_{fp} + V_s)]^{0.5} \quad [4-13]$$

V_{fp} , es la vulnerabilidad física de las personas

V_s es la vulnerabilidad social

N: es el número de personas potencialmente afectadas por el flujo

CAPITULO 5

METODOLOGÍA

La aplicación de los conceptos y teorías expuestas en los capítulos anteriores para la definición del riesgo por inundaciones y flujo de detritos, en la parte alta de la cuenca de la Quebrada San Cristóbal, requiere de la realización de una serie de actividades de campo y oficina, aplicación de herramientas de cálculo y análisis y la interpretación de esta información. En el presente capítulo se hace una breve descripción de la parte metodológica de cada actividad que se ha desarrollado y en el Capítulo 6 se presentan los resultados de las mismas.

Este capítulo está estructurado de la misma forma que el Capítulo 4-Marco Teórico, en donde inicialmente se presentan el marco metodológico para la obtención de la información básica, entre esta la topografía, geología, etc. Posteriormente se presentan los procedimientos de los procesos para obtener información a partir de la información básica como el modelo de erosión o los análisis de estabilidad. Finalmente se presentan los procedimientos para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad riesgo por inundaciones y flujos.

5.1 Topografía

5.1.1 Topografía general

Componente hipsométrico

La captura de las curvas de nivel obedece a un espacio geográfico que cubre los sectores catastrales relacionados en la Tabla 5-1.

NOMBRE DEL BARRIO	CÓDIGO DEL SECTOR	CÓDIGO DE LOCALIDAD
MODELO SUR	001209	04
CALVO SUR	001210	04
LAS BRISAS	001101	04
NARINO SUR	001207	04
VELODROMO	001114	04
PRIMERO DE MAYO	001112	04
MOLINOS DE ORIENTE	001104	04
TIBAQUE	101306	04
LOS LAURELES I	101305	04

NOMBRE DEL BARRIO	CÓDIGO DEL SECTOR	CÓDIGO DE LOCALIDAD
BUENOS AIRES	001102	04
SAN JAVIER	001110	04
SOCIEGO	001205	04
QUINTA RAMOS	001206	04
SANTA ANA SUR	001111	04
VITELMA	001103	03
LA MARIA	001109	04
HOYA SAN CRISTOBAL	101301	04
SAN CRISTOBAL SUR	001108	04
MONTE CARLO	001115	04
SAN BLAS	001106	04
LAS MERCEDES	001107	04
SAN PEDRO	001306	04
EL TRIANGULO	001105	04
SAN BLAS II	001113	04
AGUAS CLARAS	101304	04
RAMAJAL	001307	04

Tabla 5-1. Sectores catastrales.

El área de estudio se ajusta a las coordenadas dentro del siguiente marco referencial, bajo el sistema de coordenadas oficial de Bogotá:

DESCRIPCION	COORDENADAS (m)
Y MAXIMA (NORTE)	99212,218750
Y MINIMA (SUR)	90253,765625
XMINIMA (OESTE)	98059,640625
X MAXIMA (ESTE)	105701,968750

Tabla 5-2. Sistema de coordenadas oficial de Bogotá.

Projected Coordinate System: Bogota_Transverse_Mercator

Projection: Transverse_Mercator

False_Easting: 100000,00000000

False_Northing: 100000,00000000

Central_Meridian: -74,08091667

Scale_Factor: 1,00000000

Latitude_Of_Origin: 4,59904722

Linear Unit: Meter (1,000000)

Geographic Coordinate System:

GCS_Bogota

Datum: D_Bogota

Prime Meridian: 0

Por la naturaleza de la fuente de datos, la captura de información se llevo a cabo bajo tres escenarios, a saber:

- Digitalización de planchas a escala 1:5000 fuente Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Empalme y edición de las curvas de nivel del Ministerio de Medio Ambiente, a escala 1:10000
- Empalme y edición de las curvas de nivel de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, a escala 1:25000.

Las zonas a las cuales se les hizo cada uno de los tratamientos se muestra en la Figura 5-1.

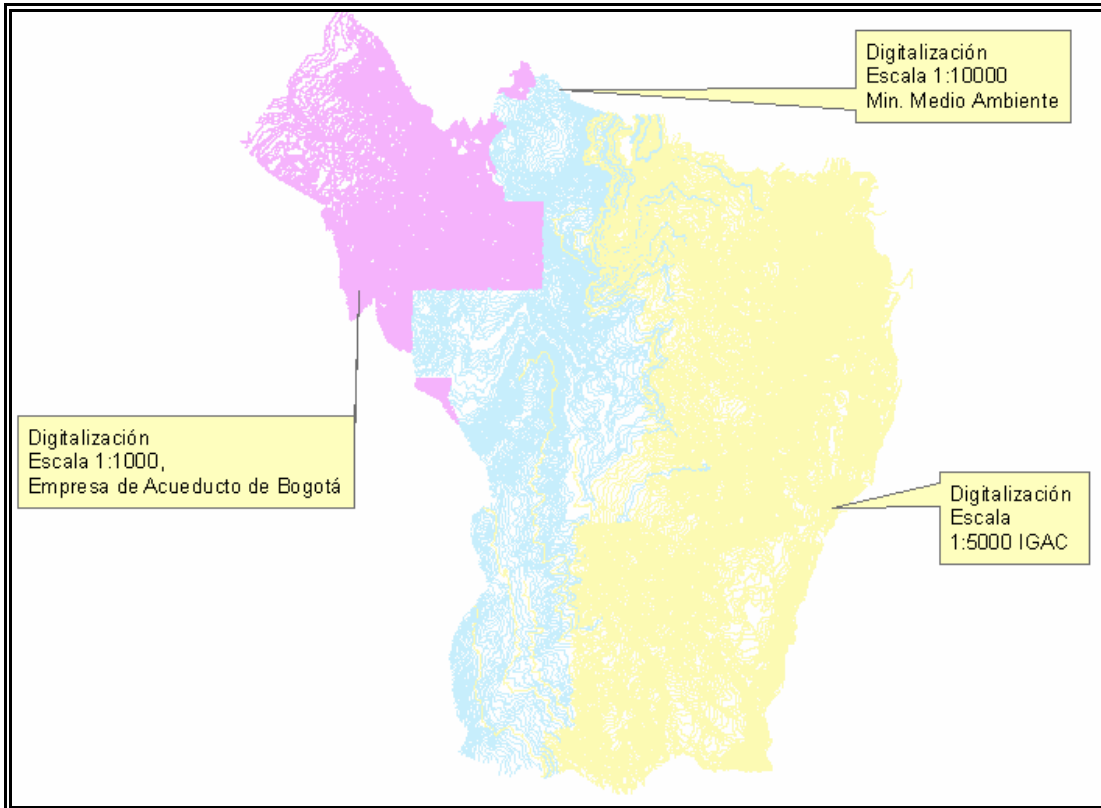


Figura 5-1. Naturaleza Información Capturada.

Procesos de captura

Digitalización Planchas a Escala 1:5000 del IGAC: Este proceso consistió en primera instancia escanear las imágenes correspondientes a las planchas 72, 73, 81 y 82 con una resolución de 400 dpi. Posteriormente se dio lugar a la georreferenciación de las mismas garantizando un nivel de precisión de $\frac{1}{4}$ de milímetro por el factor de escala de las planchas. Finalmente una vez georreferenciadas las planchas se logró desarrollar la captura de la información.

Empalme y edición de las curvas de nivel del Ministerio de Medio Ambiente: Este proceso consistió en armonizar el empalme de las curvas de nivel del ministerio, frente a las curvas de nivel digitalizadas del IGAC, tal como se refleja en la Figura 5-2.

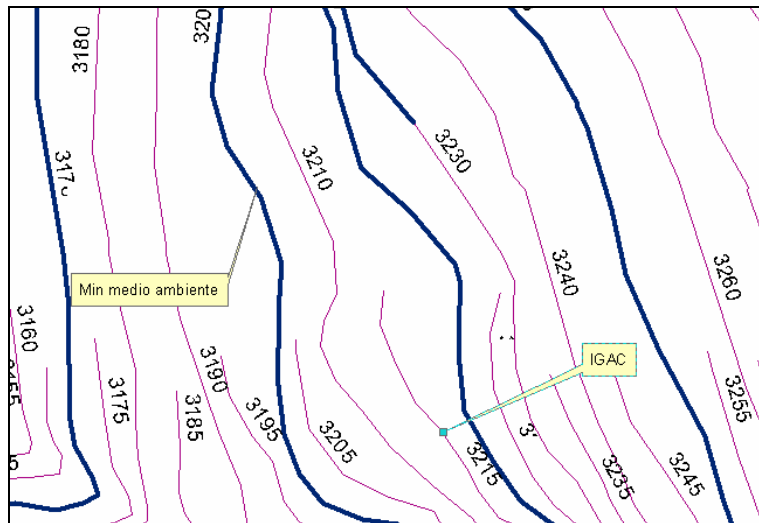


Figura 5-2. Las curvas de color azul representan las del Min. Ambiente mientras que las de color magenta representan las digitalizadas del IGAC.

Empalme y edición de las curvas de nivel de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá: Esta parte no sólo consistió en asegurar el correcto empalme con las curvas del Ministerio del Medio Ambiente sino, también la edición al interior de ellas, ya que tenía problemas en el empalme y dificultaba el modelado de las mismas para la generación de un modelo digital de terreno.

Estructura

La estructura final de las curvas de nivel entregadas en formato shapefile tiene el siguiente componente de datos:

Details for o6101

Type of object: Feature Class

Number of records: 13190

Attributes

FID

Alias: FID

Data type: OID

Width: 4
Precision: 0
Scale: 0
Definition:

Internal feature number.

Definition Source:

ESRI

Shape

Alias: Shape
Data type: Geometry
Width: 0
Precision: 0
Scale: 0
Definition:

Feature geometry.

Definition Source:

ESRI

FNODE_

Alias: FNODE_
Data type: Number
Width: 9

TNODE_

Alias: TNODE_
Data type: Number
Width: 9

LPOLY_

Alias: LPOLY_
Data type: Number
Width: 9

RPOLY_

Alias: RPOLY_
Data type: Number
Width: 9

LENGTH

Alias: LENGTH
Data type: Float
Width: 13
Number of decimals: 11

O6101F2_

Alias: O6101F2_
Data type: Number
Width: 9

O6101F2_ID

Alias: O6101F2_ID
Data type: Number
Width: 9

FNODE1

Alias: FNODE1
Data type: Float
Width: 19
Number of decimals: 11

TNODE1

Alias: TNODE1
Data type: Float
Width: 19
Number of decimals: 11

LPOLY1

Alias: LPOLY1
Data type: Float
Width: 19
Number of decimals: 11

RPOLY1

Alias: RPOLY1
Data type: Float
Width: 19
Number of decimals: 11

O6101F1_

Alias: O6101F1_
Data type: Float
Width: 19
Number of decimals: 11

O6101F1_ID

Alias: O6101F1_ID

Data type: Float

Width: 19

Number of decimals: 11

ID

Alias: ID

Data type: Float

Width: 19

Number of decimals: 11

TALT

Alias: TALT

Data type: Number REPRESENTA LA COTA DE LA RESPECTIVA CURVA DE NIVEL.

Width: 9

ESTADO

Alias: ESTADO

Data type: String EXPRESA FUENTE DEL DATO (DIGI; MINA; ACUE)

El mapa base de topografía para todo el análisis que se hace en la zona piloto, se presenta en el Plano Topografía General.

5.1.2 Topografía Particular

Este levantamiento se realizó con el objetivo de hacer la georeferenciación (es la ubicación espacial de uno o varios puntos en un plano cartesiano con origen definido, localizados con base en un par de coordenadas NORTE, ESTE y una altura o cota respecto al nivel del mar.) del eje del Río San Cristóbal ubicado en la parte sur de la ciudad de Bogotá; para poder obtener perfil longitudinal del río, así como secciones transversales y levantar afluentes al río.

Este levantamiento topográfico se realizó por el método de poligonal abierta (Serie de líneas que no regresan al punto de partida, formando una poligonal abierta geométrica y analíticamente). Las poligonales abiertas no proporcionan comprobaciones de los ángulos. Para verificar que se está realizando bien el trabajo se realiza doble lectura tanto en ángulo como en distancia de los datos que se toman en las estaciones topográficas. Las distancias medidas se verifican también leyendo adelante y atrás. Como se conocían las coordenadas Norte, Este y Altura de los puntos de apoyo se trabajó por el método de azimut directo.

El trabajo realizado partió del CD 834 con señal de azimut a la iglesia de Monserrate, placas certificadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Una vez localizados en el CD 834 y ubicado el azimut con línea a Monserrate se procedió a lanzar visuales y localizar las estaciones topográficas para avanzar la poligonal. En cada una de las estaciones topográficas se tomo la información necesaria para generar la topografía del río (radiación de detalles). Cada 500 m aproximadamente se tomo información del terreno a lado y lado del eje del río en una longitud aproximada de 50 m, (longitud total de 100 m) para obtener las secciones transversales.

En la parte inicial del trabajo, la zona urbana, se tomo información para secciones transversales en los puentes que pasan sobre el río. El levantamiento se avanzo por medio de deltas o estaciones topográficas tomando detalles necesarios para llevar a cabo el objetivo del trabajo.

En cada una de las afluentes que debían ser levantadas se definieron puntos de control (estaciones o deltas de la poligonal) para tomar la topografía necesaria para generar los perfiles de estas. La longitud levantada de estos afluentes fue de aproximadamente 50 m. En los afluentes se tomo información a lado y lado del eje para obtener la sección transversal de esta, en aproximadamente 30 m (15 m a lado y lado del eje). Las coordenadas de estos puntos de control (deltas o estaciones) se encuentran en el listado de coordenadas.

Una vez se completo la toma de información se continuo con el trabajo de oficina, que era procesar la información tomada en campo para poder dibujar la planta, los perfiles, y las secciones transversales tanto del río como de las afluentes levantadas.

En la planta general se dibujo el eje del río y todos los detalles tomados en campo, se muestran los sitios donde se tomaron las secciones transversales y los afluentes levantados. El eje del río y el perfil longitudinal se abscisaron cada 50 m, las secciones transversales se identificaron con la abscisa correspondiente.

Se generaron planos planta-perfil, planos de perfiles longitudinales y secciones transversales.

El equipo utilizado fue el siguiente:

- * 1 Estación Total Nikon NPL 352 Serie 031791
- * 2 Prismas
- * 2 Bastones porta prismas

- * 5 Radios de comunicación motorola punto apunto
- * 1 Batería Original
- * 1 Cargador Original
- * 1 Trípode en aluminio
- * 1 Morral de carga

La Estación Total es un instrumento óptico de precisión destinado a la medida de ángulos horizontales y verticales, al igual que un medidor electrónico de distancias con su correspondiente microprocesador. Con una estación total se puede determinar la longitud y la dirección de cada visual de forma rápida y exacta. El microprocesador calcula los componentes vertical y horizontal de la distancia, así mismo el azimut de la visual y las coordenadas del punto visado.

Los prismas son instrumentos de precisión elaborado de cristal del altísima calidad, que permite por medio de procesos ópticos, reflejar la señal emitida, ya sea infrarroja o láser de un distanciómetro o una estación total, y permitir el cálculo de la distancia horizontal, vertical o inclinada.

5.2 Geología

La geología para ingeniería es una disciplina que necesita de la participación de casi todas las ramas del conocimiento de la geología: son necesarias buenas descripciones de los materiales (suelos y rocas), levantamientos estratigráficos en detalle, levantamiento de información estructural en detalle, definición de aspectos hidrogeológicos generales, comprensión particular de los procesos de esfuerzo-deformación tectónicos y aspectos de dinámica exógena en su relación con factores micro tales como tamaños de grano en los suelos, composición de rocas y suelos, porosidad y permeabilidad, microdeformación, etc; factores meso como el fracturamiento de macizos rocosos, diferenciales de permeabilidad en estratos, meteorización, etc. y factores macro como la influencia del fallamiento, las glaciaciones pretéritas y del régimen climático con el fin de acercarse de manera holística y sistémica al comportamiento de los materiales.

Este enfoque integrativo parte de un pensamiento intuitivo, sintético, holístico y no lineal propio de la geología y debe complementarse con el enfoque asertivo del pensamiento racional, analítico, reduccionista y lineal de la ingeniería.

La mirada amplia y relativamente somera de los enfoques integrativos y sistémicos necesita el estudio en diferentes escalas, tanto espaciales como temporales: observaciones de imágenes remotas (fotografías aéreas, imágenes de satélite y de radar), observación de afloramientos (mediciones, observaciones) y observaciones a escala micro en muestras representativas o excepcionales (lupa, microscopio). De igual manera, en la escala temporal se maneja el concepto de tiempo geológico, y para el caso de la zona de estudio es importante la comprensión de procesos que comenzaron hace cerca de 100 millones de años con la sedimentación en el mar cretácico, los procesos de trasgresión-regresión marinos que marcaron los 50 millones de años siguientes, el levantamiento de los Andes, de manera lenta entre 50 y 10 millones de años antes del presente y con pulsos fuertes entre 10 y 3 millones de años antes del presente; dicho levantamiento implicó el cambio climático por aumento progresivo de altitud de esta porción de la corteza, pero el levantamiento se detuvo hace 3 millones de años y ha permanecido relativamente estable hasta hoy. En este último periodo, la característica principal ha sido el proceso de glaciaciones-deglaciaciones con tasas de recurrencia de aproximadamente 100.000 años y aun más reciente, la intervención humana, la cual marca los últimos 10.000 años y de manera fuerte los últimos 500 años, con un cambio en los usos del suelo que son un factor definitorio del cambio climático global que afecta la totalidad del planeta en los últimos 50 años.

A continuación se exponen las fases de trabajo realizadas:

1. Fase I. Reconocimiento del terreno

Se llevaron a cabo 3 salidas de campo con el fin de reconocer accesos, definir caminos, observar de manera rápida la estratigrafía del área y planear la fase de campo.

2. Fase II. Terreno.

Esta fase ocupó cerca de 30 días/geólogo, especialmente en la zona montañosa que es la menos estudiada de manera previa. Incluyó el establecimiento de criterios de identificación de las formaciones geológicas existentes en la microcuenca, especialmente a partir del trabajo de Pérez & Salazar para el Grupo Guadalupe, Julivert para Guaduas, Cacho y Bogotá y Van der Hammen para Tilatá y Tunjuelo.

Se llevó a cabo el levantamiento de la cartografía geológica de dichas formaciones, levantamiento de columnas estratigráficas no detalladas y medición sistemática e intensa de datos estructurales (fallas, diaclasas y planos de estratificación).

En las rocas se observaron aspectos de geometría externa de capas (forma, espesor, contactos) e interna (estratificación, laminación, etc.); forma, composición y tamaño de granos en areniscas; fisibilidad en arcillolitas; permeabilidad con ensayos cualitativos rápidos de campo (velocidad de infiltración de agua, facilidad de paso de aire soplado a través de muestras de roca, etc.); fracturamiento en cuanto a separación de discontinuidades, espesor de brechas, etc.

Para los suelos se llevaron a cabo ensayos rápidos de campo en aspectos como plasticidad, granulometría (con lupas de 10 o 15 aumentos), permeabilidad y consistencia.

Las unidades de trabajo corresponden a suelos y rocas cartografiables en escala 1:5000 y que sean representables en perfiles en la misma escala (donde espesores de 10 metros son apenas 2 mm).

3. Fase III. Revisión de información existente

Una vez culminada la fase de campo se revisó la información bibliográfica compilada, haciendo énfasis en aspectos de cartografía geológica, datos estructurales, definición de estilos estructurales y existencia de procesos morfodinámicos.

4. Fase IV. Fotointerpretación

El objeto de la fotointerpretación tuvo dos vertientes principales: las relaciones estructurales (pliegues y fallas) y relaciones geológicas (estratigrafía). En la primera, la morfoestructura de una región comprende aspectos como la disposición estructural, la presencia de lineamientos y fallas, ganchos de presión, lomos alineados, etc. En la segunda, los contactos geológicos, que fueron básicos en la elaboración de los mapas geológico y geomorfológico, articulados con la información de campo.

La fotointerpretación, por otra parte, permite tener la visión amplia de la cuenca en espacios de tiempo adecuados. Este procedimiento permite articular la información, producir un mapa geológico, enlazar los elementos particulares medidos directamente y determinar grandes rasgos del estilo estructural que opera en la cuenca y que ha sido el responsable de la geomorfología actual junto con los procesos erosivos y denudativos.

5. Fase V. Análisis de oficina y realización de los informes y mapas

- Observación de muestras con lupa binocular

Es importante mencionar que algunas muestras de rocas y suelos fueron observadas y descritas con lupa binocular de 40 aumentos, con el fin de mejorar las descripciones recogidas en campo.

- Tratamiento estadístico de los datos estructurales

Las relaciones estructurales (pliegues, fallas, lineamientos, diaclasamientos, planos estriados, etc.) merecen una alta importancia en el detalle del estudio, toda vez que ellos pueden tener gran incidencia en aspectos de amenaza sísmica, fracturamiento del macizo rocoso, etc.

Con el fin de tener datos para proponer las relaciones estructurales se realizó una campaña de medición sistemática de discontinuidades (cerca de 2500 datos) y se tiene una medida de rumbo y buzamiento cada 50 metros en las secciones de campo (de manera que se tengan datos cada cm. en el mapa en escala 1:5000). Además se han medido elementos estructurales como sistemas conjugados de fracturas tipo riedel, estrías de fricción, ejes de pliegue y micropliegue, etc. con el fin de suministrar una interpretación de la configuración de esfuerzos tectónicos que han configurado la cuenca, además de una interpretación regional de las estructuras que operan en la porción sur de los cerros orientales en la Sabana de Bogotá y determinan su evolución. Este procesamiento consiste en un tratamiento geoestadístico de los elementos estructurales mediante software Stereonett 2.46 y FaultKin 1.2 2, especiales para ello. Los estereogramas, producto del procesamiento, permiten una visualización sintética de toda la información obtenida.

- Relaciones estratigráficas

Las relaciones estratigráficas están dadas por la secuencia espacio-temporal que ocupan las rocas objeto de estudio.

- Cartografía

En los mapas geológicos se plasman las relaciones estratigráficas y estructurales con el fin de tener un modelo coherente de la corteza en la zona de estudio. Para lograr dicho modelo es necesario asumir hipótesis y descartar mediciones u observaciones no concordantes con las tendencias generales. De esta manera, se obtiene una representación de la realidad con incertidumbres y con la carga de prejuicios que llevan al cartógrafo a darle peso relativo a las variables en un proceso epistemológico no independiente del valorador y del proceso del conocimiento.

5.3 Geomorfología

1. Fase I. Reconocimiento del terreno

Se llevaron a cabo 3 salidas de campo con el fin de reconocer accesos, definir caminos, observar de manera rápida la morfología del área y planear la fase de campo.

2. Fase II. Terreno.

Las unidades de trabajo corresponden a formas y procesos cartografiables en escala 1:5000 y que sean representables en perfiles en la misma escala (donde espesores de 10 metro son apenas 2 mm).

Se levantaron características de unidades morfológicas como coluviones, aluviones y morrenas y de algunos procesos morfodinámicos con levantamiento con cinta y nivel Abney.

3. Fase III. Fotointerpretación

Se realizó la fotointerpretación multitemporal, con fotografías aéreas desde la década de los años 40 del siglo XX. Esta fotointerpretación se centró en la ubicación de procesos morfodinámicos y de antiguas extracciones mineras y en general de la transformación llevada a cabo por las actividades humanas sobre la geomorfología original (rellenos, extracciones, excavaciones, etc.) y la intervención en lo relacionado con cambios en la cobertura vegetal en la cuenca alta.

Las fotografías aéreas usadas fueron escogidas por su escala, por su calidad en mostrar rasgos morfoestructurales y morfodinámicos o por contener información sobre momentos en el tiempo que pudieran ser representativos de hechos importantes en relación con el objeto del trabajo.

En la fotointerpretación se usaron estereoscopio de espejos y estereoscopios de bolsillo, los cuales tienen mayor aumento en los lentes y permiten detallar puntos de interés.

4. Fase IV. Análisis de oficina y realización de los informes y mapas

Para elaborar la clasificación de unidades geomorfológicas y elementos morfodinámicos se utilizó como base la metodología del ITC (Internacional Institute for Aerospace Sourcey and Earth Sciencies) de Holanda, propuesta por Van Zuidam (1985) y los criterios expuestos por Villota (1991) y Vargas (1999).

5.4 Fotointerpretación de procesos denudacionales

5.4.1 Revisión de fotografías aéreas

Esta etapa es la inicial y necesita la definición precisa de la zona de estudio; se lleva a cabo en las instalaciones del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, la cual es la institución que maneja todo lo relacionado con fotografías aéreas.

Una vez la zona de estudio es ubicada en los cuadrángulos establecidos se localizan las líneas de vuelo que pasaron sobre la zona de estudio. Dichos vuelos que se encuentran organizados por décadas y se sugiere empezar la revisión con las fechas más recientes, especialmente en zonas transformadas por urbanismo o por extracción de materiales.

A cada vuelo corresponde un sobre con un número variable de fotografías aéreas y deben ser revisados y ubicada la zona de estudio con criterios geomorfológicos.

5.4.2 Criterios de escogencia

Dependiendo de los objetivos del estudio se escogen las mejores fotografías aéreas (por escala, por calidad o por que la imagen contenga aspectos de interés dependiendo del proyecto). Para el caso de estudio, los criterios tenidos en cuenta fueron de tipo geológico (lineamientos claros, disposición estructural, etc.), geomorfológico (procesos activos y geformas evidentes), de escala (definición de procesos de tamaño pequeño), entre otras.

El listado de fotografías aéreas se muestra en la Tabla 5-3.

Vuelo	Escala	Fecha	Fotos
C2717	1 : 21.000	2004	241 - 245
R1212	1 : 29.000	1996	156 - 160
C2521	1 : 50.000	1993	64 - 66
C2323	1 : 18.000	1987	174 - 178
C2161	1 : 9.000	1984	85 - 94
C2161	1 : 8.000	1984	70 - 80
C2116	1 : 10.000	1983	51 - 57
C1447	1 : 10.000	1973	79 - 82
C1063	1 : 20.000	1963	2137 - 2143
M127	1 : 60.000	1957	1844 - 1846
C774	1 : 3.500	1956	395 - 396
C673	1 : 10.000	1953	24 - 25
C415	1 : 20.000	1945	6 a 11
A2	1 : 26.000	1938	208 - 212

Tabla 5-3. Listado de fotografías aéreas.

5.4.3 Preparación del material

Una vez se tienen las fotografías aéreas se prepara el material adhiriendo acetatos transparentes con el fin que la interpretación sea hecha sobre ellos y no se dañen las fotografías. Se puede trabajar con marcadores permanentes o con lápices de colores del tipo vidrio-graf.

5.4.4 Fotointerpretación

Para el caso de estudio se contó con estereoscopio de espejos y con estereoscopios de bolsillo. El estereoscopio de espejos tiene magnificación máxima de 2X para zonas muy pequeñas, aunque se trabaja generalmente para escalas no detalladas de trabajo. Los estereoscopios de espejos trabajados tienen magnificación de 2X y 4X y son muy versátiles dado que el par de fotos a interpretar no se fijan (el estereoscopio de espejos permanece también fijo) y pueden ser amplificadas fácilmente las zonas de interés.

La fotointerpretación multitemporal de procesos de dinámica morfológica tiene como base la delineación de formas que evidencian el movimiento de porciones de terreno. Las evidencias son el contraste cromático (en caso que el proceso sea reciente), geometrías típicas (formas alargadas para flujos, formas relativamente semicirculares para deslizamientos, bloques perceptibles desprendidos de formas escarpadas), contrastes de tono (grises más oscuros que muestran concentraciones de humedad en flujos de tierra), entre otras.

Además de la ubicación de procesos morfodinámicos y de antiguas extracciones mineras se observa de manera general la transformación llevada a cabo por las actividades humanas sobre la geomorfología original (rellenos, extracciones, excavaciones, etc.), la intervención en lo relacionado con cambios en la cobertura vegetal y la dinámica de crecimiento urbano.

Las fotografías aéreas usadas fueron escogidas por su escala, por su calidad en mostrar rasgos morfoestructurales y morfodinámicos o por contener información sobre momentos en el tiempo que pudieran ser representativos de hechos importantes en relación con el objeto del trabajo.

En la fotointerpretación se usaron estereoscopio de espejos y estereoscopios de bolsillo, los cuales tienen mayor aumento en los lentes y permiten detallar puntos de interés.

5.4.5 Resultados

Los resultados obtenidos son básicos en la ubicación de los contactos de las unidades litológicas, de lineamientos tectónicos (que pueden ser fallas geológicas

si los datos de campo lo comprueban), de contactos de unidades geomorfológicas y sobre todo, son fundamentales en la elaboración de mapas morfodinámicos (de procesos de remoción en masa y erosión) y en la comprensión de observaciones de campo de dichos procesos. Es probable tener en campo procesos que son reactivaciones de procesos de mayor magnitud y es la fotointerpretación la que permite definir estas situaciones.

5.5 Hidráulica e hidrología

La metodología a desarrollada en esta fase del proyecto consiste en analizar de forma coherente la información hidroclimatológica recopilada, con el fin de caracterizar la cuenca del río San Cristóbal, establecer el régimen de lluvias, y determinar hidrogramas de caudales de creciente asociados a diferentes períodos de retorno. A continuación se presentan de forma resumida, los pasos a seguir en el desarrollo de esta actividad.

5.5.1 Procesamiento y análisis de la información cartográfica

En esta etapa se obtendrán parámetros como áreas, perímetros, tiempos de concentración entre otros, propios de la cuenca y de las subcuencas que la componen; estos insumos básicos para obtener hidrogramas de caudales de creciente, se analizan para explicar el comportamiento de la cuenca frente a eventos extremos de lluvia.

5.5.2 Procesamiento y análisis de la información de lluvias en la cuenca

El estudio de los datos de lluvia permite describir el régimen de precipitaciones a nivel anual, mensual y diario, así como el comportamiento espacio temporal de eventos específicos de lluvia sobre la cuenca. El análisis de las series históricas permitirá establecer eventos puntuales de lluvias extremas que hubiesen podido generar alguna avenida torrencial; adicionalmente, se analiza el comportamiento espacial de la lluvia para determinar la precipitación media multianual sobre la cuenca, así como los volúmenes de lluvia para diferentes eventos asociados a periodos de retorno.

5.5.3 Procesamiento y análisis de la información de caudales en la cuenca

El régimen de caudales en el río San Cristóbal se determina a partir de la información de la estación limnimétrica El Delirio. Para ello, se estiman curvas de duración de caudales y niveles y se analizará el régimen de caudales con miras a calibrar un modelo de lluvia escurrentía en la cuenca.

5.5.4 Calibración de un modelo lluvia escorrentía

Contando con la información referente a los procesos de infiltración, precipitación, cobertura vegetal y usos del suelo, así como también la geomorfología de la zona de estudio, es posible calibrar los parámetros de un modelo lluvia escorrentía puesto que se cuenta con datos de caudales en el río y precipitación en la cuenca.

5.5.5 Estimación de caudales de creciente

Una vez calibrado el modelo lluvia escorrentía, se pueden determinar hidrogramas de caudales de creciente en la cuenca, asociados a diferentes períodos de retorno. Esta información es importante para la modelación de flujos en el cauce.

5.5.6 Aforos de caudal

La herramienta empleada para la medición de caudales por el método de trazadores, se denomina IDF “Inirida Deep Flow” y fue desarrollada por la empresa Colombiana Amazonas Technologies.

Este equipo de medición está constituido por un sensor (Figura 5-3) que detecta las concentraciones de sal en la masa de agua, una interfase que traduce los datos recibidos por el sensor y los dirige hacia un equipo PDA que almacenan y procesa en tiempo real los datos tomados en campo.



Figura 5-3. Equipo de medición de caudales

En términos generales, la herramienta empleada IDF es un conjunto integrado de hardware y software que detecta, mide, modela y analiza las curvas de trazador, extrayendo de ellas en el sitio y en “tiempo real” la información más significativa desde el punto de vista de la hidráulica y del transporte de masa. Fundamentalmente el equipo IDF toma una curva de trazador, y con base en ecuaciones genera un “modelo” que se compara con el dato experimental para verificar la bondad de la construcción teórica. En este trabajo se utiliza para cada medición, la verificación del “modelo” y se emplea como trazador, el cloruro de sodio (sal común).

Procedimiento

La metodología empleada para la realización de los aforos líquidos, se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Como condición inicial, es importante conocer si el trazador se dispersa uniformemente en la sección transversal del flujo, es decir, que haya logrado mezcla completa para obtener una mayor aproximación al dato real de caudal en ese tramo del cauce.

Esta mezcla completa, es determinada por el IDF a partir de una función de estado de naturaleza termodinámica, denominada función de asimetría (Φ), que describe el grado de asimetría no-Fickiana de la curva de trazador. Cuando esta toma un valor igual o menor a 0.38 ($\Phi < 0.38$), indica que el trazador, como un gas ideal, llega a las fronteras secas del cauce y transfiere calor a los alrededores

Por tal razón, para alcanzar una mezcla completa, se define una distancia mínima de cuatro veces el ancho promedio del canal, medido desde el punto de localización de los sensores, hasta el sitio donde se realiza el vertimiento del trazador.

Como dato de entrada para la herramienta IDF, también se tomaron los anchos superiores medios de la lámina de agua en el tramo analizado.

2. El vertimiento del trazador, se realiza una vez se tenga conectado el equipo aguas abajo, de forma que se pueda coordinadamente, tomar el tiempo que el trazador se demora en llegar desde el punto de vertimiento hasta el sitio de localización de los sensores. La masa de esta sustancia también se mide debido a que esta es un parámetro de entrada a la herramienta IDF y permite realizar el balance de masa en tramo estudiado.



Figura 5-4. Instalación del equipo IDF

3. Una vez se realice el vertimiento, la medición es continua hasta que toda la masa del trazador vertido, pasa por el punto de medición.
4. Las mediciones se llevaron a cabo, midiendo el caudal sobre los afluentes al río San Cristóbal, y sobre éste cauce principal, así como se muestra en la Figura 5-5.

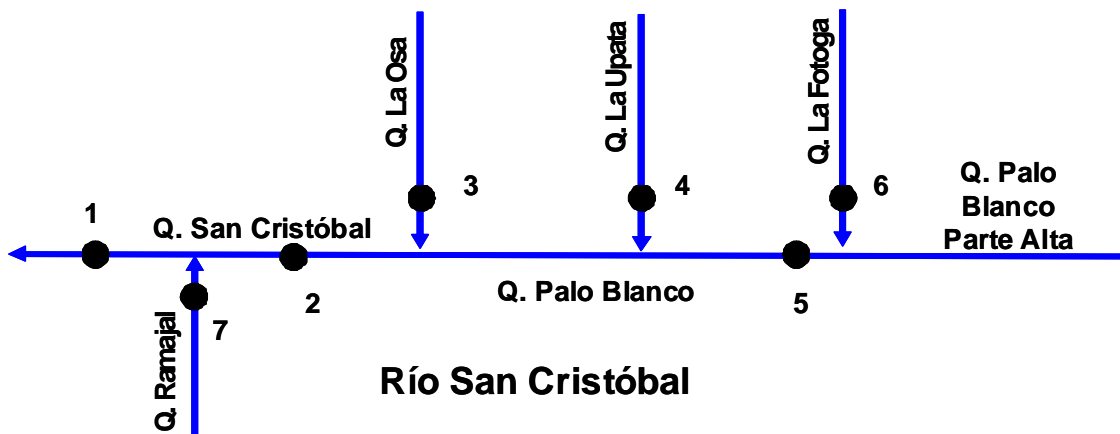


Figura 5-5. Puntos de medición de caudales

Interpretación

Curva experimental obtenida

Hay varios aspectos que se deben considerar en la selección de la curva, tal como:

Ruido de alta frecuencia: Esto hace referencia a las variaciones en los datos de la medición. Este ruido es normal y típico de todo experimento. En dichas variaciones existen unos mínimos y unos máximos valores. Hemos encontrado que las modelaciones son mejores cuando la altura supera al menos en 10 veces la magnitud de esta variación. Por ejemplo, si tengo un valor en la lectura que oscila entre 3.0 y 3.1 PPB, la magnitud de la variación será de 0.1 PPB, y por consiguiente si deseo tener una modelación apropiada y confiable, la magnitud de la altura de la curva del trazador debe ser para este caso de 1 PPB. En otras palabras para este nivel de ruido si la lectura base es de 3.0 PPB, debo inyectar suficiente trazador para que la curva alcance por lo menos 4.0 PPB. Análogamente es igual si en lugar de PPB estamos hablando de conductividad. Por ejemplo, una conductividad base que oscile entre 100 y 105 uS/cm. requerirá que el pico de la curva del trazador alcance al menos 150 uS/cm.

Altura De la Curva: La altura de la curva del trazador debe ser la suficiente, de tal manera que la “altura” del ruido de alta frecuencia no sea relevante. La altura debe ser al menos 10 veces la altura del ruido de alta frecuencia.

Masa de Trazador Vertida: El cumplimiento de lo expuesto en los dos párrafos inmediatamente anteriores, queda cubierto utilizando la cantidad de trazador suficiente. Sino se llegare a detectar problemas de ruido o altura en la curva, lo recomendable es realizar un nuevo vertimiento con mayor cantidad de trazador.

Asimetría: El grado de asimetría de la curva esta relacionado con la longitud de mezcla. El software IDF cuenta con una herramienta que da una orientación en este sentido. No obstante, siempre que haya longitud de mezcla, y la altura de la curva sea la suficiente como para que el ruido de alta frecuencia no sea relevante, la coincidencia de la curva de modelación y la curva experimental asegurara que hubo o no longitud de mezcla.

Curva de modelación obtenida: En este sentido, la curva que presente mayor coincidencia con la curva experimental, será la que brinde los datos y resultados más confiables. Y esto depende en gran medida de lo expuesto en el numeral anterior.

Distancia para el vertimiento: Si se llegaren a encontrar problemas por modelación, debe verificarse la cantidad de trazador utilizada, y la distancia a la cual se realizo el vertimiento.

Caudal por el método del área bajo la curva: El Inirida Deep Flow cuenta con esta herramienta, la cual en muchos casos ayuda a verificar el dato de caudal obtenido por otro método como es el de la ley de conservación de masa. No obstante hay que evaluar la integración de la curva, ya que en muchos casos,

especialmente si se presentaron variaciones bruscas en la curva o un ruido momentáneo abrupto, esto deteriora el dato obtenido. De todas maneras, es un punto de referencia importante.

Grandes diferencias de caudal

Cuando se realizan varios vertimientos que permiten obtener curvas que llevan a resultados de caudal con diferencias apreciables, debe entrar a considerarse lo siguiente:

Vertimientos a diferentes distancias: El éxito del método de trazadores está de la mano con la longitud de mezcla. Si la distancia seleccionada para el vertimiento es igual o superior a la longitud de mezcla, se estará cumpliendo con uno de los factores para obtener datos y resultados confiables. Cuando se hace un vertimiento a una distancia menor que la longitud de mezcla y otro vertimiento a una distancia mayor de la longitud de mezcla, obtendré datos de caudal con grandes diferencias. La magnitud de la diferencia dependerá de que tan por debajo de la longitud de mezcla realice el vertimiento. Si se realizan ambos vertimientos por debajo de la longitud de mezcla, también puedo obtener diferencias, ya que en donde se estén tomando los datos no se tendrá una “mezcla homogénea” del trazador, y puede en un caso pasar una alta concentración, y en otro caso una baja concentración del trazador, conllevando a resultados diferentes.

Vertimientos de diferentes masas de trazador: La cantidad de trazador a inyectar o a verter depende por un lado de orden de magnitud de caudal que se pretende aforar, y por otro lado de la magnitud del “ruido de alta frecuencia”. Cuando la cantidad de trazador vertida es suficiente para obtener una curva de suficiente altura con respecto al “ruido” el error que pueda presentarse en la altura de la curva de modelación puede ser menor (del orden de un 5%). Cuando la masa de trazador vertida es insuficiente para lograr una curva de altura suficiente con respecto al “ruido”, el error en la altura de la curva de modelación es superior al 5 % y será mayor, en la medida en que el nivel de ruido sea más relevante con respecto a la altura lograda en la curva experimental. Si se hacen dos vertimientos de diferentes masas, uno con una masa que permite la obtención de una altura que supere suficiente el nivel de ruido, y otra que por el contrario no lo logre, se obtendrán dos curvas de modelación que llevar niveles de “error” diferentes, y los caudales obtenidos a partir de estar dos curvas serán tan diferentes como alejados por debajo se este de la masa mínima para obtener una curva de altura mínima suficiente.

Corrección por sedimentación suspendida: Cuando se realizan vertimientos con trazador fluorescente (Rodamina WT) en aguas apreciablemente turbias y/o

con sedimentación suspendida, es necesario calcular un factor de corrección para el resultado de caudal.

1. **Método de corrección:** Esto aplica solo cuando se utiliza trazador fluorescente y existe turbidez y sedimentación suspendida. Cuando esto sucede, los resultados obtenidos hacen necesario recoger una muestra en el sitio para hacer una corrección del caudal teniendo en cuenta este factor. Para el cálculo del factor de corrección se debe utilizar la metodología expuesta en el documento “A Practical Guide to Flow Measurement using a Fluorometer” en la sección “DYE LOSS” que se encuentra dentro del grupo de documentos de soporte y aplicaciones suministradas por Turner.

2. Procedimiento a realizar

- De acuerdo con el procedimiento mencionado, se utiliza por un lado “agua desmineralizada” y por el otro el agua traída de muestra.
- Se hacen dosificaciones de igual cantidad de rodamina sobre cantidades iguales de agua desmineralizada y de agua de muestra.
- A continuación se realizan las mediciones respectivas de fluorescencia y de concentración con el Inirida Deep Flow.
- Una vez obtenidas las mediciones respectivas se procede a encontrar la relación entre estas a fin de obtener el factor de corrección.

Sumario

Si se tienen varias curvas de un mismo tramo pueden darse dos situaciones:

Repetibilidad de los resultados: Esto puede ocurrir utilizando iguales cantidades o no de trazador, y puede ocurrir utilizando iguales o diferentes distancias para el vertimiento, o puede ocurrir una combinación de los casos anteriores. En cualquier caso, habrá repetibilidad de los resultados si y solo si las distancias utilizadas son todas mayores o iguales a la longitud de mezcla, y si la masa de trazador utilizada, permite obtener una curva con una altura apropiada según lo expuesto a lo largo del presente documento. Este es un caso, en el cual la sugerencia siempre será trabajar con el promedio de los resultados obtenidos.

Diferencias en los resultados: Si no se tienen resultados congruentes, o del mismo orden, y las diferencias superan el 5 o 10%, lo más probable es que en alguno de los casos no se vertió la cantidad apropiada de trazador o no se vertió a

la distancia apropiada; también es posible que se haya presentado un ruido temporal o momentáneo (el cual sería apreciable en la gráfica de la curva) que no permita una modelación apropiada. Es aquí donde se analiza la forma de la curva, el nivel y clase de ruido, y la coincidencia de la curva de modelación para cada una de las curvas obtenidas, y se selecciona la que cumpla con la mayoría de recomendaciones expuestas a lo largo de este documento, o en su defecto, la que más se aproxime y pueda tener un menor porcentaje de error.

- 1. Ruido de baja frecuencia:** Siempre se preferirá la curva que presente un nivel de ruido de menor amplitud con respecto a la altura de la curva del trazador.
- 2. Asimetría de la curva:** Siempre se preferirá la curva con mayor grado de simetría, por que esto es un efecto de un vertimiento realizado a una mayor distancia lo que indica estar por encima, o al menos más cerca de la longitud de mezcla.
- 3. Curva de modelación:** Siempre se preferirá el dato de caudal obtenido a través de la curva de modelación que presente la mayor coincidencia con la curva experimental. Esta coincidencia está directamente relacionada con los dos ítem anteriores de este numeral, ya que entre menor sea la amplitud del ruido con respecto a la altura de la curva del trazador, y mayor sea la simetría de la misma, la coincidencia de la curva de modelación también será mayor.

5.5.7 Análisis hidráulicos

Estos análisis, como ya se mencionó, se realizaron empleando los modelos matemáticos HEC-RAS y FLO-2D.

Procesamiento de la información cartográfica

Básicamente el procesamiento de la cartografía, para los objetivos planteados, se focaliza hacia la obtención de un buen modelo digital de elevación del terreno; al tener en la parte baja, que es la zona de mayor interés, curvas con alturas cada metro, la precisión del modelo de elevación del terreno, es mejor en comparación a la parte alta, donde las curvas están separadas cada diez metros de elevación.

Implementación de los modelos matemáticos

Los modelos matemáticos a emplear en este estudio, presentan una serie de requerimientos de información de entrada, la cual debe ser suministrada de forma

sistemática; en esta parte de la metodología, se construyeron las simulaciones a realizar con los diferentes modelos teniendo en cuenta la calidad de la información de entrada a éstos.

Análisis de la capacidad hidráulica del cauce del Río San Cristóbal empleando el HEC-RAS

Se establece para el cauce del río San Cristóbal su capacidad hidráulica para diferentes caudales, simulando el comportamiento del flujo en el cauce, empleando el modelo HEC-RAS en régimen de flujo permanente gradualmente variado. Este análisis involucró también las estructuras sobre el cauce, esencialmente los puentes y alcantarillas, a los cuales también se les realizó un análisis de su capacidad hidráulica.

Determinación de zonas de amenaza por flujos de agua con y sin sedimentos

En este análisis, se establecen las zonas de amenaza por inundación de agua con y sin sedimentos, en el cauce principal del río San Cristóbal, y las quebradas La Pichosa, Ramajal y el Triangulo localizadas en la zona urbana de la cuenca (parte baja). Este análisis se realizó empleando el modelo matemático FLO-2D, para diferentes escenarios de modelación de dichos flujos.

Datos de entrada al modelo HEC-RAS

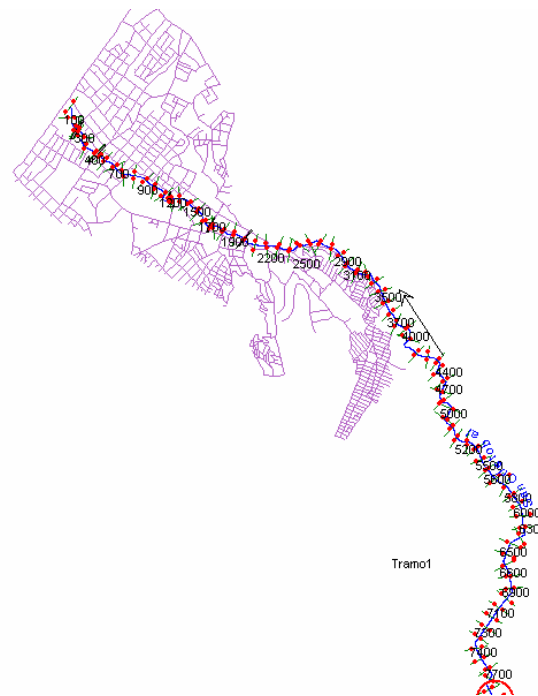


Figura 5-6. Esquema de localización de secciones transversales en el HEC-RAS

5.6 Geotecnia

5.6.1 Inventario de procesos

El objetivo general del inventario de procesos morfodinámicos es el de localizar, cartografiar y caracterizar cada uno de los eventos de movimientos en masa que hayan ocurrido dentro de la zona de estudio, de tal forma que el producto final brinde un panorama detallado sobre la distribución geográfica de los mismos, el volumen de material inestable (disponible) y su litología, las causas o factores contribuyentes y detonantes, las características de las laderas afectadas principalmente su geometría y cobertura, y la relación existente entre cada uno de los aspectos mencionados y los mecanismos de falla. Este inventario de procesos puede denominarse como inventario de procesos activos o actuales, para diferenciarlos de aquellos procesos antiguos que o ya fueron transportados

completamente o que han sido cubiertos y que se han identificado a partir del análisis multitemporal de las fotografías aéreas.

Localización y caracterización de procesos

Para la captura de la información en campo, se decidió hacer uso del formato de inventario de movimientos en masa utilizado por INGEOMINAS, desarrollado dentro del Proyecto Multinacional Andino, PMA, formato que ha sido estructurado de tal forma que se consignen en él todos los datos relevantes de cada uno de los procesos de inestabilidad.

Es importante que la información de diferentes inventarios de procesos se consigne en un mismo formato con el fin de construir un catálogo de procesos que permitan el estudio estadístico de la información para ser aplicada en análisis de amenaza y riesgo. El formato de inventario se presenta en el Anexo B – 1 y se encuentra dividido en las secciones que se listan a continuación:

- Localización geográfica y documental del evento
- Actividad del movimiento
- Litología y estratigrafía
- Clasificación del movimiento
- Morfometría del movimiento
- Causas del movimiento
- Efectos secundarios
- Importancia del evento
- Daños asociados al evento
- Notas y apreciación d el riesgo
- Esquema del movimiento

Los conceptos utilizados en las secciones de *Actividad del movimiento*, *Clasificación del movimiento* y *Morfometría del movimiento*, obedecen a los expuestos por Cruden y Varnes en su artículo “Landslides Types and Processes”, el cual hace parte de Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247, compendiado y editado por Turner y Shuster en 1996.

Las demás secciones no involucran ninguna clasificación particular, la terminología y conceptos utilizados en el formato se pueden consultar en la Guía preparada por el INGEOMINAS que acompaña el formato utilizado y que se incluye aquí como el Anexo A-1 (Ojeda, 2006).

Sistematización de la Información

Como respaldo de la información recopilada en campo y pensando en el análisis estadístico de la misma, se diseñó una base de datos que contiene todos y cada uno de los campos del formato de inventario. En el Anexo B – 2, se incluyen las fichas del catalogo generado.

Análisis estadístico del inventario de procesos morfodinámicos

El inventario de procesos morfodinámicos ofrece una información primaria, tal como la distribución geográfica de las zonas inestables y el volumen de material disponible actual. Sin embargo, el potencial de la información obtenida va más allá, toda vez que a través del análisis estadístico de los datos obtenidos en campo, es posible establecer relaciones entre cada una de las variables inventariadas y los mecanismos de falla.

De esta manera se esperan encontrar relaciones entre los mecanismos de falla y las unidades geológicas superficiales, los factores detonantes y contribuyentes más recurrentes por mecanismo de falla y algún tipo de relación entre litología, pendiente y mecanismos de falla, entre otras. Estas relaciones se establecerán a partir del análisis de correlación entre las variables y de su estadística descriptiva.

5.6.2 Investigación del subsuelo

Debido a que en la cuenca de estudio los principales procesos de inestabilidad identificados fueron fallas planares en los depósitos coluviales y por no contar con autorización de la CAR para ejecutar labores de exploración, la investigación del subsuelo se limitó a ejecutar perforaciones manuales en los coluviales. De estas se obtuvieron muestras inalteradas para la caracterización física y mecánica de estos depósitos. Para el caso de los suelos residuales y material rocoso se debió recurrir a información secundaria para obtener los parámetros requeridos para el

análisis. Para poder complementar la exploración manual se programaron ensayos geofísicos que permitieran definir los espesores de los depósitos, en este caso se hicieron tomografías eléctricas y líneas sísmicas.

Para estudios a nivel regional sobre grandes extensiones de terreno, los programas de exploración geotécnica deben estar diseñados sobre algún tipo de zonificación previa, para lo cual se puede hacer uso de mapas de unidades superficiales, mapas geológicos, mapas de unidades geomorfológicas o incluso mapas agrológicos.

La exploración geotécnica debe orientarse a la consecución de la información necesaria para los fines prácticos del estudio, que para este caso, resulta ser la caracterización de la cada uno de los materiales existentes en la zona.

De acuerdo con los mecanismos de falla observados en la fase de reconocimiento de campo inicial, al igual que la definición de los materiales más problemáticos en relación con los procesos de inestabilidad, la exploración geotécnica puede ser orientada a la consecución de un mejor nivel de detalle en dichas zonas.

Cualquier programa de investigación del subsuelo, independiente del tipo de estudio que se esté desarrollando, debe cumplir por lo menos con los siguientes objetivos.

- a) Establecer el perfil del suelo en el sitio, determinando la secuencia de los estratos en función de su espesor y de ser posible o de interés, el nivel del lecho rocoso.
- b) Obtener información respecto a las características del nivel freático en el sitio.
- c) Determinar las propiedades necesarias para la identificación, descripción y clasificación de los diferentes estratos y obtener los parámetros necesarios para los modelos geotécnicos.

Para estudios a nivel regional, la exploración geotécnica deberá diseñarse haciendo uso de las diferentes técnicas de prospección existentes, entre las que se pueden mencionar los ensayos geofísicos, a saber, ensayos de refracción sísmica, tomografías y sondeo eléctricos verticales, SEV. Por otra parte, dichos ensayos deberán complementarse con sondeos mecánicos, de tal forma que se puedan calibrar y ajustar los resultados de los primeros, además de obtener muestras que puedan ser sometidas a los ensayos de clasificación, resistencia y deformabilidad, requeridos.

A continuación se mencionan algunas generalidades de dos métodos de prospección geofísica: Líneas sísmicas y Tomografías eléctricas.

Líneas sísmicas

Los métodos sísmicos se basan en la detección del frente de ondas elásticas producidas por una fuente artificial (martillo), propagadas a través del subsuelo que se investiga y detectadas en superficie mediante sensores (geófonos), obteniéndose una imagen del terreno con base en las propiedades elásticas de los materiales.

Gracias a los principios físicos bajo los cuales está fundamentado el ensayo, éste se trata de un método no invasivo y no destructivo y no afecta para nada el entorno ambiental del sitio.

El objetivo principal de la ejecución de las líneas sísmicas es la obtención de algunos parámetros geomecánicos de los materiales presentes, en especial la velocidad de onda, con la cual se pueden estimar de manera indirecta otras propiedades físicas y mecánicas.

Tomografías eléctricas

La tomografía eléctrica es un método de prospección geofísica no destructivo que determina la distribución real de la resistividad del subsuelo. Esta propiedad puede ser presentada como la dificultad que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica a través de él, es decir, es el inverso de la conductividad.

El contraste en el comportamiento geoelectrico de los materiales permite obtener perfiles 2D e imágenes 3D del terreno, pudiendo diferenciar todo tipo de discontinuidades en el subsuelo mediante una adecuada interpretación.

5.7 Cobertura y uso del suelo

5.7.1 Caracterización urbana

Una vez identificadas las características normativas que clasifican el suelo en sus componentes urbano y rural se determina la caracterización urbana estableciendo en primer lugar la división administrativa que se encuentra en el área de estudio;

es decir la subdivisión en comunas, localidades, sectores, barrios, etcétera; esto permitirá cuantificar el número de localidades, comunas, sectores, barrios manzanas y predios involucrados en el área de estudio y/o de afectación.

De igual manera se determina el componente topográfico a nivel macro, con el fin de determinar la variabilidad de la altura sobre el nivel del mar en toda el área de estudio.

Se establecen condiciones de cubrimiento de servicios públicos domiciliarios y la generalidad de la actividad económica predominante en la zona.

Clasificación

Una vez identificada el área de estudio, se consideró necesario analizar la información procesada por la Unidad Administrativa de Catastro Distrital, en cuanto al inventario de los bienes inmuebles que mantiene en las bases de datos; toda vez que en cabeza del IGAC se encuentra la competencia legal en cuanto a la dirección técnica, la ejecución y el control administrativo de los catastros en sus diversas etapas, tal como se nota en el artículo 26 de la resolución 2555 de 1988 del IGAC. No obstante la existencia de autoridades catastrales independientes como el caso de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, se registrará bajo los lineamientos establecidos por la autoridad Nacional, pero ejercerá sus funciones estratégicas de carácter independiente.

Por lo tanto la Unidad Administrativa de Catastro Distrital, tiene como una de sus funciones llevar a cabo el reconocimiento predial (en cualquiera de las etapas de la actividad catastral a saber: formación, actualización o conservación catastral¹), actividad que consiste en todas aquellas actividades tendientes a renovar los

¹ Según la Resolución N° 2555 De 1988 del INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI" (...)

Artículo 88 La actualización de la formación catastral consiste en el conjunto de operaciones destinadas a renovar los datos de la formación catastral, mediante la revisión de los elementos físico y jurídico del Catastro y la eliminación en el elemento económico de las disparidades originadas por cambios físicos, variaciones de uso o de productividad, obras públicas, o condiciones locales del mercado inmobiliario.

Artículo 28. Formación catastral.- Es el proceso por medio del cual se obtiene la información correspondiente a los predios de una unidad orgánica catastral o parte de ella, teniendo como base sus aspectos físico, jurídico, fiscal y económico, con el fin de lograr los objetivos generales del catastro.

Artículo 92. Objetivos de la conservación catastral. La conservación del Catastro tiene los siguientes objetivos: 1. Mantener al día los documentos catastrales, de acuerdo con los cambios que experimente la propiedad inmueble; 2. Asegurar la debida conexión entre el Notario, el Registro y el Catastro; 3. Designar de manera técnica los inmuebles en los documentos públicos y en los actos y contratos en general; 4. Establecer la base para la liquidación del impuesto predial, y de otros gravámenes y tasas que tengan su fundamento en el avalúo catastral; 5. Actualizar la carta catastral y otras cartas temáticas; y 6. Proporcionar la información que sobre los recursos básicos se posea, para la promoción del desarrollo económico y social del país.

datos obtenidos en los procesos de Formación, Conservación catastral o última actualización, mediante la recopilación de la información de los cambios sucedidos en el aspecto físico (áreas de terreno, construcción, usos y calificación de las construcciones) y jurídico (relación entre el propietario o poseedor con el bien inmueble).

Esta información es incorporada en los documentos catastrales (fichas prediales y cartografía) elaborados para tal fin y su posterior actualización al sistema gráfico y alfanumérico. Los objetivos llevados a cabo en esta etapa, según la Unidad Administrativa de Catastro Distrital (UACD) tienen como fin:

Realizar la actualización jurídica partiendo de la base de datos suministrada por las Oficinas de Registro de Instrumentos Públicos, mediante un proceso automático diseñado por la subdirección de Informática de la UACD.

Detectar a partir de la información de segregaciones suministrada por las Oficinas de Registro los predios nuevos no incorporados en la base de datos de la UACD.

Depurar en la medida de lo posible el archivo Gráfico y Alfanumérico de los predios a actualizar de modo que la información puesta en vigencia sea cargada directamente al módulo gráfico (correspondencia uno a uno entre los predios del archivo gráfico con el alfanumérico).

En este reconocimiento predial se desarrolla una calificación de la construcción que tiene como objetivo cualificar la construcción respecto a una serie de variables físicas que caracterizan la construcción y que permiten además de cualificar a los predios cuantificar el valor del metro cuadrado de construcción, el formato sugiere los siguientes aspectos de calificación:

ITEM CALIFICADO		PUNTOS	CARACTERISTICAS
1	ESTRUCTURA		
11	ARMAZON		El armazón constituye el apoyo de la estructura terminada de una construcción, de su composición depende la capacidad que en altura se puede desarrollar y pr tanto su capacidad portante. Los edificios mayores y más altos suelen requerir sistemas de apoyo más complicados, y ofrecen menos flexibilidad para elegir el techado: el motivo fundamental es que las estructuras tienen que soportar cargas a lo largo de distancias mayores que en edificios más pequeños o de menor altura.
111	MADERA	0	
112	PREFABRICADO	1	
113	LADRILLO, BLOQUE	3	
114	CONCRETO HASTA TRES PISOS	3	
115	CONCRETO CUATRO O MAS PISOS	6	

ITEM CALIFICADO		PUNTOS	CARACTERISTICAS			
12	MUROS		Los métodos tradicionales de división interna de los edificios han consistido en muros de albañilería de 10 a 15 cm de espesor de hormigón, yeso o piedra pómez, pintados o encalados; también se han utilizado estructuras de madera o metal cubiertas con listones de madera enyesados. El uso de materiales de desecho, esterilla y madera laminada está muy extendido.			
121	MATERIALES DE DESECHO, ESTERILLA	0				
122	BAHAREQUE, ADOBE, TAPIA	1				
123	MADERA	2				
124	CONCRETO PREFABRICADO	3				
125	BLOQUE, LADRILLO	4				
13	CUBIERTA					
131	MATERIALES DE DESECHO, TELAS ASFALTICAS	1	se identifica por la presencia de tela asfáltica			
132	ZINC, TEJA DE BARRO, ETERNIT RUSTICO	3	se identifica por la presencia de teja de barro antigua; así tenga canales y bajantes. Eternit rústico: Sin canales, bajantes, ni cielo razo, supone estructura en madera burda.			
133	ENTREPISO (CUBIERTA PROVISIONAL) PREF.	6	Aplica para pisos superior no construido			
134	ETERNIT O TEJA DE BARRO (CUBIERTA SENCI)	9	se identifica al visualizar condiciones buenas, con canales, bajantes y cieloraso. Si no se posee una de estas condiciones se califica 3 (ZINC, TEJA DE BARRO, ETERNIT RUSTICO). EXCEPTO Si es teja de barro (arquitectónica que no utilizan canales ni bajantes). Para estratos 1, 2 y 3 siempre se califica 6 puntos (ENTREPISO)			
135	AZOTEA, ALUMINIO, PLACA SENCILLA CON ETH	13	Azotea: Se identifica por existir un acceso definido, existen barandas con fin específico. Entre tanto se califican con la misma puntuación la presencia de placa aligerada, impermeabilizante.			
136	PLACA IMPERMEABILIZADA, CUBIERTA LUJOSA	16	Se identifica por tener una cubierta ornamental con o sin placa con algún material costoso, elegantes y atractivas.			
14	CONSERVACION					
141	MALO	0				
142	REGULAR	2				
143	BUENO	4				
144	EXCELENTE	5				
2	ACABADOS PRINCIPALES					
21	FACHADAS		RESIDENCIAL	EDIFICIOS EN ALTURA	LOCALES Y VENTA DE MERCANCIA	INDUSTRIAL
211	POBRE	0	Sin lujos, ventanas pequeñas en madera burda o ángulo, bloque o ladrillo con o sin pañete, sin jardín, puerta de zinc o madera ordinaria.		Ventana pequeña, sin lujos muros en ladrillo o pañete pintado	Adobe o Tapia
212	SENCILLA	2	Puertas y ventanas de regular tamaño en ángulo o lamina o madera sin trabajar; muros en pañete o ladrillo prensado a la vista	Bloque o ladrillo a la vista sin lujos, pañete y ventanas pequeñas	Ladrillo prensado o pañete, puerta, ventana pequeña hasta 6 metros	Ladrillo Común, bloque o pañete pintado
213	REGULAR	4	Puertas y ventanas en lamina doblada; pañetadas (pañete rústico) pintadas, puerta de garajes (1) y jardín, 7 a 10 metros de frente.	Ladrillo prensado, pañete con materiales más costosos, ventanas tamaño mediano	Pañete pintado, granito, otros, ventanas medianas o amplias.	Ladrillo prensado, enchape en piedra o mármol.
214	BUENA	6	Puertas y ventanas en madera elaborada, garajes (1, 2), pañete o enchape en piedra pulida ladrillo a la vista, granito, entre 10 y 14 metros. Jardín. (Aquí no es el muro de cerramiento el que se califica).	Ladrillo prensado o enchape como piedra, granito, ventanales amplios.	En comercios individuales o centro comercial, en vidrio, enchape fino, mayor a 8 metros cuadrados para locales separados.	

ITEM CALIFICADO		PUNTOS	CARACTERISTICAS	
215	LUJOSA	8	Puertas y ventanas en madera elaborada, ocupan buena parte de la fachada, garajes (2), pañete o enchape varios planos y frentes, diseños exclusivos, grandes jardines, más de 14 metros de frente.	Enchape material costoso, mármol y/o las ventanas ocupan gran parte de la fachada
				Generalmente en centros comerciales; amplias, mucho vidrio, muros en piedra, mármol, etc.
22	CUBRIMIENTO MUROS			
221	SIN CUBRIMIENTO	0		
222	PANETE, LADRILLO PRENSADO	1		
223	ESTUCO, CERAMICA, PAPEL DE COLGADURA	2		
224	MADERA, PIEDRA ORNAMENTAL	3		
225	MARMOL, LUJOS, OTROS	4		
23	PISOS			
231	TIERRA PISADA	0		
232	CEMENTO, MADERA BURDA	2		
233	BALDOSA COMUN DE CEMENTO, TABLON LADRILL	3		
234	LISTON MACHIHEMBRIADO	4		
235	TABLETA, CAUCHO, ACRILICO, GRANITO, BALDOSA	6		
236	PARQUET, ALFOMBRA, RETAL DE MARMOL (GRANO)	8		
237	RETAL DE MARMOL, MARMOL, OTROS LUJOS	9		
24	CONSERVACION			
241	MALO	0		
242	REGULAR	2		
243	BUENO	4		
244	EXCELENTE	5		
3	BANO			
			RESIDENCIAL	COMERCIAL
31	TAMANO			
311	SIN BANO	0		
312	PEQUENO	1	0-4 metros cuadrados	0-2 metros cuadrados
313	MEDIANO	2	4-6 metros cuadrados	2-4 metros cuadrados
314	GRANDE	3	Mayor 6 metros cuadrados	Mayor 4 metros cuadrados
32	ENCHAPES			
321	SIN CUBRIMIENTO	0		
322	PANETE, BALDOSA, COMUN CEMENTO	1		
323	BALDOSIN (<0 11 X 11 CMS) CRISTANAC-PAPE	3		
324	BALDOSIN (>11 X 11 CMS) CERAMICA	4		
325	MARMOL, ENCHAPE LUJOSO	5		
33	MOBILIARIO			

ITEM CALIFICADO		PUNTOS	CARACTERISTICAS
331	POBRE	0	Cuenta con dos elementos, generalmente, sanitario y ducha
332	SENCILLO	3	Consta de tres elementos sanitario, lavamanos y ducha de tipo económico.
333	REGULAR	6	Mínimo tres elementos, división, mueble lavamanos y gabinetes color.
334	BUENO	9	Mínimo cuatro servicios, porcelanizados finos, grifería fina, gabinetes y espejos.
335	LUJOSO	11	Posees varios elementos tina, sauna, ducha, vestier, etc.
34	CONSERVACION		
341	MALO	0	Deteriorados o sin acabados
342	REGULAR	2	Deterioro marcado en los aparatos y acabados.
343	BUENO	4	Presentan mantenimiento en aparatos y acabados
344	EXCELENTE	5	No presentan maltrato en acabados generalmente con elementos lujosos.
4	COCINA		
41	TAMANO		
411	SIN COCINA	0	
412	PEQUENA	1	0-5 metros cuadrados
413	MEDIANA	2	5-10 metros cuadrados
414	GRANDE	3	Mayor a 10 metros cuadrados
42	ENCHAPES		
421	SIN CUBRIMIENTO	0	
422	PANETE, BALDOSA, CEMENTO COMUN	1	
423	BALDOSIN (<11X11CMS) CRISTANAC-PAPEL	3	
424	BALDOSIN (>11X11CMS) CERAMICA	4	
425	MARMOL, ENCHAPE, LUJOSO	5	
43	MOBILIARIO		
431	POBRE	0	Platero plancha en cemento, sin enchape
432	SENCILLO	2	Plancha en cemento, con enchape o similar
433	REGULAR	3	Gabinetes superior e inferior. Planchon en acero inoxidable.
434	BUENO	4	Gabinete superior e inferior. Planchos en acero inoxidable y Extractor
435	LUJOSO	6	Gabinete superior e inferior. Plancha en madera preformada, homo, comedor auxiliar, triturador.
44	CONSERVACION		
441	MALO	0	Deteriorados o sin acabados
442	REGULAR	2	Deterioro marcado en los aparatos y acabados.
443	BUENO	4	Presentan mantenimiento en aparatos y acabados
444	EXCELENTE	5	No presentan maltrato en acabados generalmente con elementos lujosos.
5	COMPLEMENTO INDUSTRIA		
51	CERCHAS		

ITEM CALIFICADO		PUNTOS	CARACTERISTICAS
511	MADERA	6	
512	METALICA LIVIANA	12	0-10 metros luz
513	METALICA MEDIANA	22	10-20 metros luz
514	METALICA PESADA	34	20 metros o más
52	ALTURA CERCHAS		
521	ALTURA	6	

Tabla 5-4. Calificación de la construcción. Fuente: Unidad Administrativa de Catastro Distrital marzo 2007

De esta manera se logra caracterizar la construcción, y se determinan 6 tipos de construcción de tipo residencial dependiendo del puntaje que se obtenga.

TIPO DE CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL	PUNTAJE
TIPO 1	0-10
TIPO 2	11-28
TIPO 3	29-46
TIPO 4	47-64
TIPO 5	65-82
TIPO 6	MAYOR A 82

Tabla 5-5. Clasificación de la construcción

Es importante aclarar que un sólo predio puede contener más de una actividad, es decir puede encontrar predios sobre los cuales se desarrolle varias actividades económicas por que en el primer piso se desarrolla la vivienda en el segundo el comercio, etc.

Una vez capturada está información, a través de modelos econométricos y de investigación directa en el mercado, se establece el valor por metro cuadrado de la tierra y el valor por metro cuadrado de construcción que dará lugar a la valuación total del inmueble.

Los usos de la construcción determinados en la zona de estudio se relacionan en la Tabla 5-6.

USO	NUMERO DE UNIDADES	USO DE LA CONSTRUCCIÓN
001	4177	Habitacional menor o igual a tres pisos
002	26	Habitacional mayor o igual a 4 pisos
003	106	Comercio puntual
004	142	Comercio o corredor comercial
005	14	Estaciones de servicio (oficinas en talleres)
009	27	Industria artesanal
010	14	Industria mediana
012	39	Institucional puntual
013	22	Colegio y universidades de 1 a 3 pisos
014	13	Iglesias
015	1	Oficinas y consultorios (particulares)
016	1	Colegio Universidades de cuatro pisos o más
020	23	Teatros y cinemas
022	100	Depósitos de almacenamiento
025	46	Bodega de almacenamiento
029	1	Parques de diversión
033	53	Bodega económica
037	2	Habitacional menor igual a tres pisos en propiedad horizontal
038	19	Habitacional mayor o igual a 4 pisos en propiedad horizontal
039	5	Comercio puntual en propiedad horizontal
040	6	Comercio o corredor comercial en propiedad horizontal
049	5	Parqueadero cubierto en propiedad horizontal
056	1	Restaurantes
064	3	Aulas de clases
070	42	Enramadas cobertizos
080	14	Oficinas en bodegas
096	1	Parqueadero cubierto no propiedad horizontal
TOTAL	4903	

Tabla 5-6. Uso de la construcción

Inventario de redes vitales

Es prescindible indagar acerca de la cobertura de redes vitales, entendida por ellas como la infraestructura y equipamiento de las redes de servicios públicos que constituyen un elemento determinante y de alto impacto en el análisis e investigación de eventos generadores de riesgo.

En ese orden de ideas, se clasificará la cantidad y disposición de las redes vitales de acuerdo a su caracterización:

COMPETENCIA	NIVELES DE INFORMACIÓN
DISTRIBUCIÓN DE ENERGIA ELECTRICA	Líneas de baja tensión
	Líneas de alta tensión
	Red de energía
	Torres de energía
SUMINISTRO DE GAS DOMICILIARIO	Red de Gas Domiciliario
SUMINISTRO DE ACUEDUCTO	Red primaria de Acueducto
	Red Secundaria
	Red Pluvial
SERVICIO DE ALCANTARILLADO	Red Sanitaria

Tabla 5-7. Redes vitales

De cada una de estos niveles de información es determinante identificar la composición de los materiales de conducción, así como los diámetros que caracterizan la red como tal.

5.7.2 Interpretación de imágenes aplicada al uso y cobertura de la tierra

Fase I:

- Descripción de las características básicas de la imagen y análisis de las estadísticas unibanda y multibanda. Esto se hace con el fin de determinar cuales son las deficiencias y cualidades de la imagen en cuanto a sus resoluciones espectral y radiométrica; así como para un análisis preliminar del estado del contraste y por lo tanto de identificación de la imagen.
- Identificación visual de las principales coberturas presentes en la imagen y análisis de sus características espectrales. Se hace un exhaustivo análisis de las respuestas espectrales para establecer que clases de coberturas hay presentes en la imagen, de tal forma que posteriormente se facilite la clasificación de la imagen.
- Realización, evaluación de realces:
 - Contraste: Análisis de histogramas
 - Filtros en el dominio espacial: Paso alto y Paso bajo
 - Espectrales: transformación Tasseled Cap, índices de

vegetación, transformación RGB-IHS-RGB, transformación de componentes principales.

Esto se hace con el fin de facilitar y mejorar la interpretación de la imagen tanto a nivel de resolución espacial (que se mejoren los objetos que se puedan ver más no el tamaño del píxel), como espectral, es decir que halla una mejor respuesta espectral de las diferentes coberturas que haya en la zona de estudio.

- Reconocimiento en campo: se realiza para corroborar las coberturas iniciales obtenidas en campo, y posteriormente para una retroalimentación al momento de generar el mapa definitivo; y además también se hace para cartografiar coberturas o zonas que no se ven en la imagen por efectos de nubosidad, y zonas que han cambiado en los últimos meses y que por lo tanto no alcanzan a estar en la imagen.

Fase II:

- Clasificación de las coberturas que se encuentren en la imagen, de acuerdo a un sistema de clasificación: se hace para definir una leyenda como tal, que debe estar de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

5.8 Evaluación del aporte de sedimentos por procesos erosivos

En el Capítulo 4 se presentó la formulación matemática para modelar el proceso de erosión y las particularidades de la ecuación universal de pérdida de suelo, con su sigla en inglés RUSLE, (Revised Universal Soil Loss Equation) De allí se puede concluir que el modelo matemático sólo es aplicable a condiciones ideales, reales únicamente en escenarios en los que la cobertura y disposición de materiales pueda ser asumida como homogénea a lo largo de la ladera, con una distribución uniforme de la escorrentía superficial y con información suficiente acerca del esfuerzo de corte en la superficie del suelo.

Tales condiciones sólo se pueden conseguir bajo un ambiente controlado que lejos está de las condiciones reales observadas en campo, por ello, se definió que para el nivel de detalle requerido para los fines del estudio, resulta suficiente realizar la evaluación del aporte de sedimentos mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

Así pues, el primer problema a resolver es el de la discretización espacial de la cuenca, para lo cual se debe definir una primera división correspondiente a las subcuencas y en adelante, cada una de ellas se debe subdividir en celdas de un

tamaño que será función del nivel de detalle de la información disponible y del nivel de detalle de los productos buscados.

Para cada celda se deberá evaluar el valor de los parámetros correspondientes a fin de aplicar la ecuación de pérdida de suelo y hallar la carga de sedimentos aportada por subcuenca, de acuerdo con el detalle mostrado como sigue:

5.8.1 Cálculo del factor de erosividad, R

Partiendo de los hietogramas de lluvias definidos para cada periodo de retorno, es decir, con la distribución de la lluvia en el tiempo para cada uno de los eventos utilizados en el análisis, se podrá calcular el valor del factor de erosividad de la lluvia como se describe a continuación:

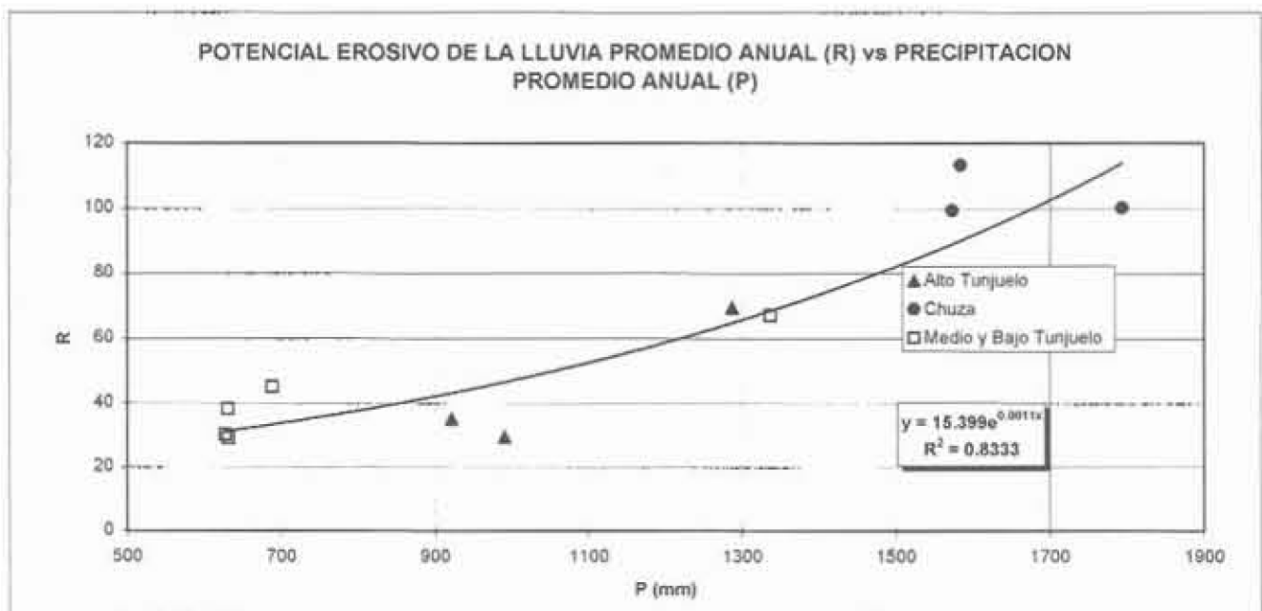


Figura 5-7. Factor de erosividad R. Tomado de "Saneamiento ambiental y control de crecientes en la cuenca alta del Río Tunjuelo"

1. Dividir la tormenta de análisis en incrementos sucesivos de intensidad uniforme.

2. Calcular la energía cinética E , para cada incremento de tiempo en el que se considere constante la intensidad, mediante la Ecuación propuesta por Wischmeier y Smith:

$$E = 1.213 + 0.890 * \text{Log}(I) \quad [5-1]$$

Donde:

E = Energía Cinética de la lluvia [(Kg*m)/(m²*mm)]

I = Intensidad de la lluvia en el intervalo de tiempo [mm/hora]

3. Se calculó el valor del factor R para la tormenta como:

$$R = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (E) * (I_j * T_j) \right] * (I_{30})}{173.6} \quad [5-2]$$

E = Energía Cinética para el intervalo de tiempo j

I_j = Intensidad de la lluvia para el intervalo j

T_j = Intervalo de tiempo

I_{30} = Máxima intensidad en 30 minutos

j = Índice del intervalo de tiempo

n = Número de intervalos de tiempo en los que se dividió la tormenta

R = Erosividad de la tormenta

Al final, se recomienda transformar las unidades de R , llevándolas a las unidades originales de la metodología, es decir, $100 * (\text{Ft} * \text{Ton}) / (\text{Acre} * \text{Pulg})$.

Es evidente que debe existir variabilidad de la lluvia dentro de la cuenca y por ende el factor de erodabilidad debe ser igualmente variable, por ello, de ser posible deberán elaborarse mapas de isoerosividad.

5.8.2 Cálculo del factor de erodabilidad del suelo, K

Como se mencionó en el marco teórico, el factor de erodabilidad es función de las propiedades del suelo a nivel superficial, por lo que se debe contar en lo posible con un mapa agrológico que sirva de base para caracterizar cada una de las unidades de suelo.

Sino se cuenta con un mapa agrológico de la zona de estudio, podrá hacerse alguna equivalencia con el mapa de unidades superficiales, sin que esto sea recomendable ya que no necesariamente existe una relación confiable entre las unidades geológicas y la composición del estrato superficial del suelo.

Para cada unidad de suelo deberá muestrearse el estrato superficial y llevarse a cabo ensayos de granulometría por tamizado, hidrometría y contenido de materia orgánica, de tal manera que a partir de la aproximación algebraica del Nomograma de Weischmeier, se pueda obtener el valor de k para cada una de ellas.

5.8.3 Cálculo de los factores topográficos L y S

Haciendo uso del modelo digital del terreno generado a partir de la información topográfica disponible, se hallarán los valores de L y S para cada una de las celdas en las que se ha discretizado la cuenca, mediante las ecuaciones propuestas por el modelo y consignadas en el Capítulo 4-Marco Teórico.

5.8.4 Cálculo del factor de cobertura, C

Como consecuencia de la cantidad de variables y la complejidad en la medición de muchas de ellas, el factor C ha sido tabulado para algunas condiciones propias en otros ambientes, sin embargo, es muy probable que las condiciones de la cuenca objeto de estudio sean particulares por lo que tal información no es del todo aplicable.

Por otro lado, la carencia de datos experimentales para la determinación del factor C a nivel local, no amerita la valoración del factor a nivel detallado, por lo que se

recomienda la adopción de la metodología simplificada utilizada en principio por la USDA, que se describe de manera general a continuación.

La zona de estudio debe ser sectorizada en primera instancia, separando las zonas en las que la cobertura predominante corresponda a bosques y en las que predominen los pastos y las tierras agrícolas.

Una vez realizada esta zonificación macro, se debe microzonificar teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

La cobertura vegetal tipo bosque debe ser caracterizada como sigue:

- Porcentaje de cobertura del follaje de los árboles de altura superior a 4.0 m
- Porcentaje de cobertura vegetal a nivel del suelo
- Características del manejo dado a la cobertura vegetal al nivel del suelo

Con la información obtenida, se puede obtener el valor del factor C con la Tabla 5-8.

Cobertura de árboles (%)	Porcentaje de Cobertura con Manto vegetal a nivel del suelo	Manejo de la cobertura en los sectores sin manto vegetal	Factor C
100 – 75	100 -90	Controlado	0.001
		No Controlado	0.003 – 0.011
70 – 40	85 – 75	Controlado	0.002 – 0.004
		No Controlado	0.01 – 0.04
35 - 20	70 - 40	Controlado	0.003 – 0.009
		No Controlado	0.02 – 0.09

Tabla 5-8. Factor C para zonas de bosque.

Los términos “Controlado” y “No Controlado en la Tabla 5-8 deben entenderse como sigue:

Controlado: El sobre pastoreo y la ocurrencia de incendios se encuentran completamente controlados.

No Controlado: Zonas sujetas a sobrepastoreo o quemas continuas

La cobertura vegetal en la que predominan los pastos y las zonas agrícolas debe ser caracterizada mínimo con la siguiente información:

1. Tipo, altura y porcentaje de cubrimiento de la cobertura aérea existente
 - Sin cobertura apreciable
 - Cobertura de baja altura (< 0.5 m)
 - Cobertura de arbustos (< 2.0 m)
 - Árboles de altura inferior a 4.0 m
2. Tipo de cobertura a nivel del suelo
 - Pastos, plantas semejantes al pasto, manto vegetal compacto con espesor superior a 2 pulgadas
 - Plantas herbáceas de hoja ancha con poco desarrollo lateral de su sistema radicular.

Para cada una de las combinaciones de las variables se obtiene un valor de C, tal como se muestra en la Tabla 5-9.

5.8.5 Cálculo del factor de prácticas de protección, P

Deberá valorarse el factor de protección en los casos en los que el área de estudio cuente con este tipo de medidas. En caso contrario, deberá asumirse el valor de P igual a la unidad (1.0), de tal forma que no se altere el resultado obtenido por la multiplicación de los cinco factores restantes.

Cobertura Aérea		Cobertura a nivel del suelo						
Tipo y altura de cobertura por encima del suelo	%	Tipo de Cobertura	Porcentaje					
			0	20	40	60	80	95 - 100
Sin cobertura apreciable		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.090	0.043	0.011
Cobertura de baja altura (h < 0.5 m)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.082	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.075	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.031	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.067	0.038	0.011
Cobertura de altura media (h < 2.0 m)	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.085	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.085	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.081	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.077	0.040	0.11
Árboles hasta de 4.0m de altura	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.085	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011

G: Cobertura tipo pasto o plantas semejantes al pasto o manto vegetal de espesor superior a 2 pulgadas.

W: Cobertura a nivel del suelo principalmente compuesto por plantas herbáceas con poco desarrollo radicular

Tabla 5-9. Factor C para zonas de pasto, tierras agrícolas o inactivas. Fuente: Gray, D.H., Leiser, A. T. 1982. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold Company.

5.8.6 Consideraciones generales a tener en cuenta en la evaluación del aporte de sedimentos

Una vez calculado el valor de erosión debe considerarse que no todo el volumen de producción se convierte efectivamente en sedimentos, ya que existen zonas de agradación entre la zona de desprendimiento y las zonas de concentración de flujo.

Por lo anterior se recomienda afectar el volumen de erosión por un coeficiente de producción, el cual puede estar dado en función de las áreas absolutas y porcentuales de las subcuencas, o utilizar datos experimentales sobre cuencas de extensión parecida a la de interés.

5.9 Evaluación del aporte de sedimentos producidos por inestabilidad de las bancas por procesos de socavación

Con el fin de considerar los aportes de sedimentos por inestabilidad de las bancas de la quebrada San Cristóbal, se asumió como hipótesis que estas fallan por la profundización del cauce por efecto de la socavación local. Los mecanismos de falla identificados en estas márgenes corresponden a fallas rotacionales, por lo tanto el análisis de estabilidad se hizo utilizando el método de equilibrio límite y el software SLIDE.

Debido a la imposibilidad de estudiar todas las bancas del río, se tomaron secciones típicas que representaran tramos homogéneos de la quebrada. A estas secciones se les hizo el análisis de estabilidad para los diferentes escenarios de lluvia y sismo considerados.

Los análisis de estabilidad se hicieron para la condición topográfica inicial y para diferentes profundidades de socavación, las cuales se incluyeron como un aumento de la profundidad del lecho.

El cambio de la profundidad del lecho se estimó usando la ecuación de Inglis (1940) para socavación local, la cual se explicó en el Capítulo 4-Marco Teórico.

El volumen total de sedimentos aportados al cauce por proceso de inestabilidad de las bancas se estimó multiplicando el área transversal del mecanismo de falla crítico por la longitud aferente de cada sección transversal analizada, multiplicado por un factor de probabilidad de falla para tomar en cuenta que no toda la banca falla. Este factor de probabilidad se estimó como la relación entre longitud de banca fallada, según el inventario de deslizamientos, y la longitud total de banca del cauce.

El resultado de este análisis es la determinación de volúmenes de sedimentos en los diferentes puntos de control asumidos en la simulación del flujo. Estos volúmenes fueron distribuidos temporalmente asumiendo la misma forma de distribución temporal de las lluvias.

5.10 Evaluación del aporte de sedimentos producidos por inestabilidad de las laderas

Para efectos del análisis regional de estabilidad y con base en la información obtenida del inventario de procesos morfodinámicos, especialmente en lo relacionado con los mecanismos de falla, de donde se pudo concluir que el mayor porcentaje de procesos activos corresponden a flujos y a caídas, es válido suponer para la modelación regional, una superficie de falla planar, y a partir de esto utilizar el modelo teórico expuesto en el capítulo 4.

Inicialmente se calculó el factor de seguridad en condición estática, el cual como se recuerda por lo expuesto en el capítulo anterior, es función de los parámetros físicos y geomecánicos del material, de la inclinación o pendiente de la ladera, de la posición del nivel freático y del espesor de la masa potencialmente inestable.

A su vez, el nivel freático para cada una de las tormentas características para cada periodo de retorno, fue calculado mediante la metodología propuesta por Pradel y Raad.

La valoración del factor de seguridad se realizó a nivel de celda de 10 m por 10 m, haciendo uso de las herramientas del sistema de información geográfica, previa alimentación del mismo con cada uno de los parámetros que intervienen en la ecuación.

Todas las celdas cuyo factor de seguridad fue inferior a 1.0 en el cálculo, fue definida como celda inestable y se procedió a computar su volumen como la multiplicación del área de la celda por el espesor de suelo existente.

Adicionalmente, para todas las celdas se calculó el valor de la aceleración crítica, definida como la aceleración capaz de inestabilizar la cuña de suelo analizada. El valor de la aceleración crítica se obtiene de igualar a uno (1.0) la ecuación de Factor de Seguridad en condición dinámica.

Por otra parte, paralelamente se determinó el valor de la aceleración en cada celda, para diferentes periodos de retorno de sismo: 10 años, 50 años, 100 años, 475 años y 1000 años, esto considerando de manera general los efectos locales.

Así, los volúmenes de las celdas inestables para la condición estática corresponden a aquellas con factor de seguridad inferior a 1.0, mientras que las celdas inestables para condición dinámica son aquellas en las que la aceleración crítica tomaba valores inferiores a los de la aceleración calculada para el escenario respectivo.

Una vez calculados los volúmenes inestables para cada una de las combinaciones lluvia – sismo, se utilizaron las curvas propuestas por Diaz-Granados, M.A., Ordoñez, J.I., Deeb, A.M., en "Determinación de coeficientes de producción de sedimentos en cuencas extensas", Memorias XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Sao Paulo, Brasil, Agosto, 1986, para hallar el porcentaje del volumen inestable que efectivamente llega a un drenaje natural.

Las curvas mencionadas se reproducen a continuación y fueron construidas a partir de la compilación de datos de producción de sedimentos por erosión en algunos ríos de Estados Unidos y Colombia. En ellas se presenta una correlación empírica del coeficiente de producción de sedimentos en función del área de la subcuenca aportante.

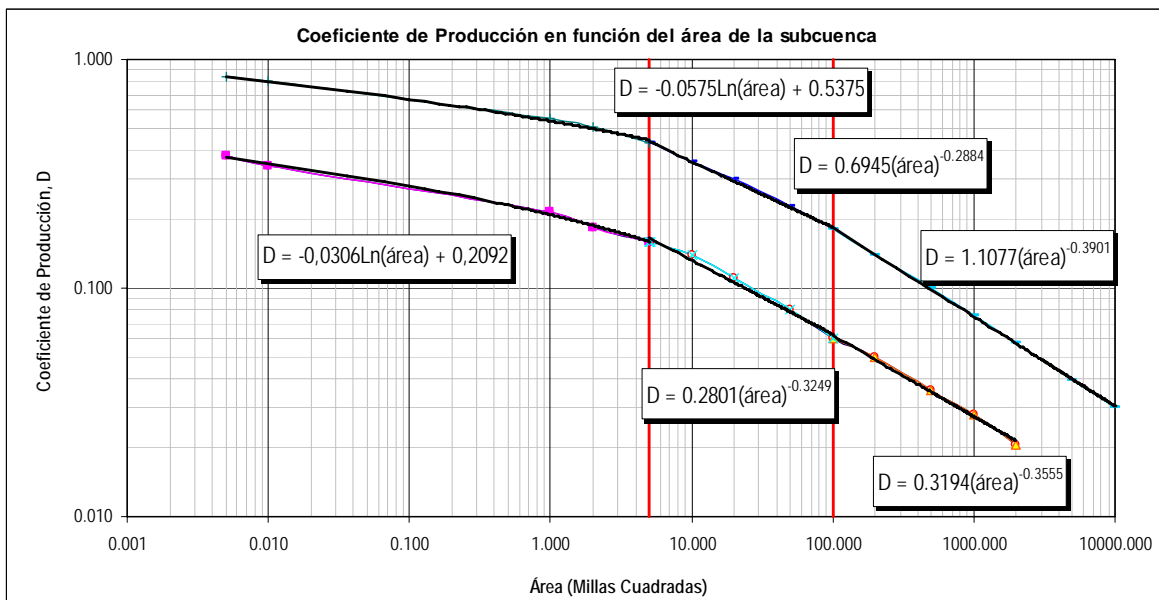


Figura 5-8. Variación del coeficiente de producción de sedimentos en función del área de la subcuenca. Fuente: Diaz-Granados, M.A., Ordoñez, J.I., Deeb, A.M., en "Determinación de coeficientes de producción de sedimentos en cuencas extensas", Memorias XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Sao Paulo, Brasil, Agosto, 1986

Para el caso de la cuenca objeto de estudio en el presente documento, los volúmenes de las zonas inestables fueron afectados por el coeficiente de producción obtenido a partir del área de la ladera, multiplicado además, por el coeficiente de producción obtenido a partir del área de la subcuenca.

5.11 Evaluación de la amenaza

La amenaza debida a los flujos e inundaciones para los diferentes escenarios considerados se determinó como la probabilidad de ocurrencia de una profundidad de flujo, velocidad, caudal por unidad de ancho y Número de Froude para cada una de las celdas en que se dividió la cuenca. Los escenarios fueron establecidos por lluvias y sismos de diferentes periodos de retorno, así como la combinación de eventos de lluvia y sismo. Para cada condición se analizaron diferentes condiciones, a saber: caudales líquidos más caudales sólidos producidos por erosión superficial de la cuenca; caudales líquidos más los sedimentos por erosión más los sedimentos por inestabilidad de las bancas del Río San Cristóbal, cuyo análisis consideró la socavación local y las cargas sísmicas; la condición anterior más sedimentos por inestabilidad de las laderas, análisis que se hizo incluyendo el efecto de la infiltración del agua en la estabilidad y las cargas sísmicas.

5.11.1 Escenarios de análisis

Los escenarios considerados se basan en los periodos de retorno de lluvia y sismos y los efectos que estos producen en términos de producción de sedimentos.

Primer escenario

El primer escenario corresponde al tránsito de los caudales líquidos sin considerar aportes de sedimentos. Este análisis se hizo para los periodos de retorno que aparecen en la Tabla 5-10. , en la que se presenta también la probabilidad anual de ocurrencia, de cada una de ellas, para un periodo de diseño de 50 años.

La probabilidad de ocurrencia se estimo con la siguiente expresión:

$$p(LI) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n$$

Donde T_r es el periodo de retorno de la lluvia, el cual se obtuvo considerando un modelo de distribución de probabilidad tipo Gumbel. n es el periodo de vida útil o periodo de diseño.

Periodo de retorno lluvia	Probabilidad de ocurrencia
5	0.999
10	0.995
25	0.870
50	0.636
70	0.513
90	0.428
100	0.395

Tabla 5-10. Periodos de retorno y probabilidad de ocurrencia de las lluvias de análisis para un periodo de diseño de 50 años.

Segundo escenario

El segundo escenario corresponde al generado por las lluvias de análisis incluyendo los volúmenes de sedimentos debido a erosión superficial de la cuenca. Debido a que este escenario está definido por las lluvias su probabilidad de ocurrencia es igual al que se presenta en la Tabla 5-10.

Tercer escenario

Como tercer escenario se modeló el tránsito de los flujos incluyendo los volúmenes de sedimentos por erosión superficial más el aporte de la inestabilidad de las bancas.

Para el análisis de la inestabilidad de las bancas se hicieron análisis de estabilidad de cuatro secciones a lo largo del cauce, las cuales definieron sectores homogéneos desde el punto de vista geotécnico. Para considerar la estabilidad en los escenarios de lluvia se determinó para cada sección la profundidad de socavación esperada, a partir de los resultados de altura de agua y velocidad que se obtuvieron con el tránsito de sólo caudales líquidos. En los casos en que la profundidad de socavación fue mayor que la altura crítica de la banca, se consideró como volumen de sedimentos el área del mecanismo de falla crítico multiplicada por la longitud total del sector que la sección representa.

Con el fin de considerar que no hay una falla generalizada de la banca, el volumen estimado se multiplicó por un factor de reducción obtenido como la relación entre

la longitud de banca fallada actualmente sobre la longitud total del cauce. Esta relación puede tomarse como una probabilidad de falla a lo largo del cauce.

La probabilidad de ocurrencia de este escenario también está definida por los periodos de retorno de las lluvias, de acuerdo con la Tabla 5-10.

Cuarto escenario

Como cuarto escenario se analizó el tránsito del flujo considerando el caudal líquido, más los sedimentos producidos por erosión de la cuenca más el volumen de sedimentos producidos por falla de las bancas asociadas con socavación más el volumen de sedimentos producidos por la falla de las laderas como procesos de deslizamiento debido al avance del frente húmedo.

El análisis de falla de las laderas se estimó utilizando falla planar con un flujo paralelo a la superficie del terreno a una profundidad igual a la profundidad de avance del frente húmedo para las lluvias de análisis consideradas.

El volumen total de sedimentos desprendidos se obtuvo como la sumatoria de los volúmenes fallados, calculados como el producto del área de la celda fallada por el espesor del suelo en dicha celda. Una celda fallada se definió como aquella en que el Factor de Seguridad era menor que uno.

La probabilidad de ocurrencia de este escenario está dado por el periodo de recurrencia de las lluvias de análisis, como se mostró en la Tabla 5-10.

Quinto escenario

Este escenario considera adicionalmente el volumen de sedimentos producidos por la inestabilidad de las laderas por el efecto combinado de lluvia y sismo. Debido a que aquellos volúmenes de deslizamientos debido al efecto del agua ya se consideraron en el escenario anterior, este escenario establece cuales celdas nuevas fallan por la acción del sismo después del efecto de las lluvias de los escenarios anteriores.

Para todas las celdas se definió la aceleración crítica incluyendo el efecto del agua, la cual se comparó con la aceleración esperada en los escenarios de sismo considerados. En este caso se consideró una celda fallada aquella en que la aceleración esperada era menor que la aceleración crítica.

La aceleración esperada en superficie se determinó a partir de las aceleraciones esperadas a nivel de roca de acuerdo con el estudio de amenaza sísmica del sector, mayoradas por el efecto combinado de amplificación por geología y de topografía.

Los efectos de amplificación por geología se consideraron tomando los valores de amplificación para aceleración pico propuestos por Pergalani et al (1999), los cuales se resumen en la Tabla 5-11.

De acuerdo con la propuesta del Código Francés (AFPS, 1995), excepto en casos en que se considera en cálculos dinámicos el efecto topográfico del movimiento sísmico, se tiene en cuenta un coeficiente de amplificación, τ . Este coeficiente relativo a un punto P, es determinado a partir de las características del perfil de mayor pendiente pasando por P, ver Figura 5-9. Es posible definir entonces varias líneas de mayor pendiente (crestas o depresiones), por tanto conviene considerar los perfiles más desfavorables.

Se entiende por líneas de cresta y arista un cambio de pendiente correspondiente a un relieve convexo, las dos pendientes están del mismo sentido(o una de ellas es nula) en el primer caso y de sentidos contrarios en el segundo, Figura 5-10.

Como líneas de cresta y arista se entiende un cambio de pendiente correspondiente a un relieve convexo, las dos pendientes están en el mismo sentido (o una de ellas es nula) en el primer caso y de sentidos contrarios en el segundo.

Unidad litológica	Espesor (m)	Factor de amplificación
Cono de deyección y cono de deyección activo	< 10	1.2
	10-20	1.5
	20-30	1.7
Colusión	< 10	1.2
	10-20	1.5
	2-30	1.7
Deslizamientos activos, inactivos, escarpes de deslizamiento.	< 10	1.2
	10-20	1.4
	2-30	1.6
Flujos de detritos y flujos de tierra	< 10	1.2
	10-20	1.5
	2-30	1.7
Unidades de roca y suelos residuales poco profundos		1.0
Valle aluvial (gruesos)	< 10	1.1
	10-20	1.2
	2-30	1.4

Tabla 5-11. Factores de amplificación por geología (Tomado de Pergalani et al., 1999)

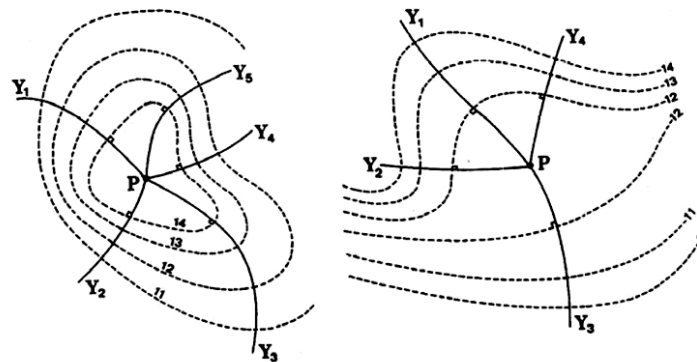


Figura 5-9. Seleccionar el perfil mas desfavorable de $Y_i P Y_j$

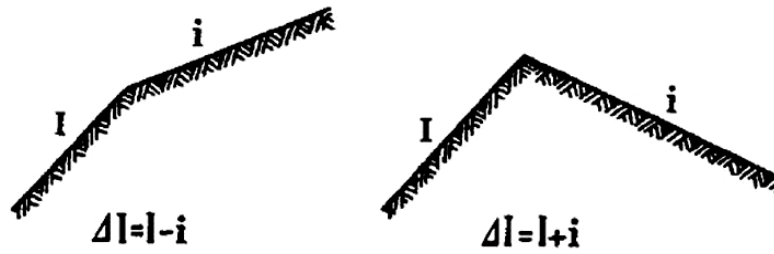


Figura 5-10. Esquema utilizado para el cálculo del coeficiente de cresta o arista.

Estando el perfil esquemáticamente descompuesto en secciones sucesivas, que en el interior de aquellas se considera uniforme, los elementos del relieve que intervienen en el cálculo de τ son:

- Bordes de la cresta alrededor del punto P con las condiciones de la Figura 5-11, Figura 5-12 y Figura 5-13.

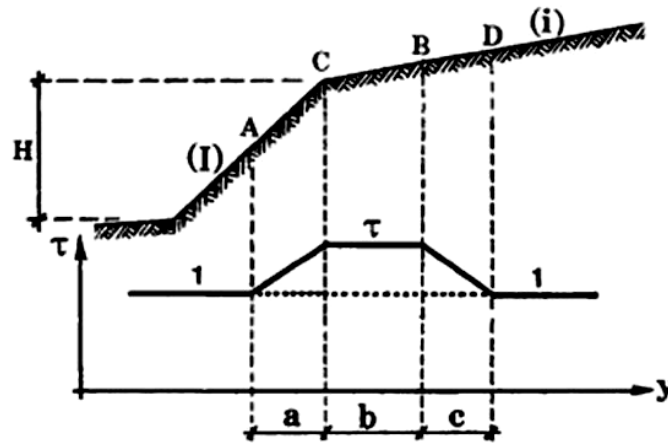


Figura 5-11. Esquema para el cálculo del coeficiente de amplificación debido a topografía.

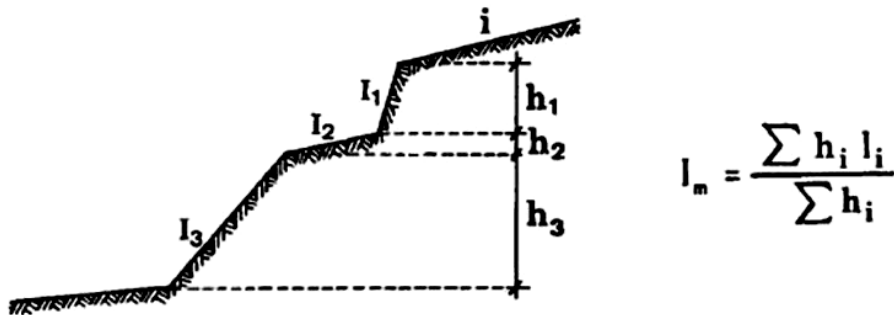


Figura 5-12. Muestra el caso para el cálculo de la pendiente ponderada.

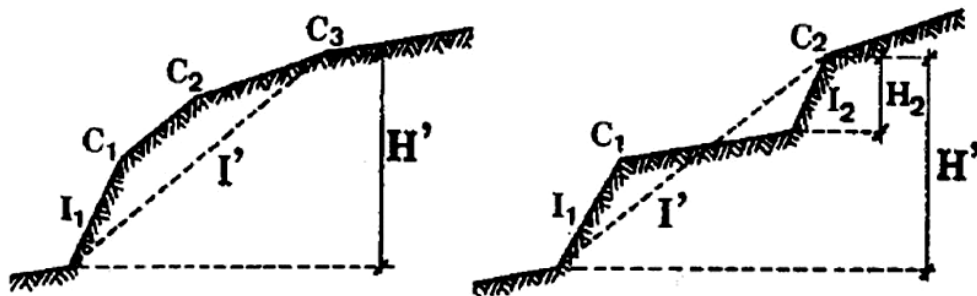


Figura 5-13. Esquema para el cálculo de bordes de crestas

- Eventual proximidad de los rebordes de la cresta o de depresiones o elevaciones Figura 5-13.

El valor de τ para tener en cuenta el efecto sísmico debido a la topografía en una construcción, es el más desfavorable de los valores obtenidos del entorno del sitio de interés.

La determinación de H es de apreciación (Figura 5-13.). A título indicativo se puede considerar como base del relieve el punto más bajo donde la pendiente general del sitio es inferior a 0.40.

La determinación de l puede ser cualquier tramo de pendiente l de longitud pequeña. Dentro de esta situación como la de la Figura 5-12 es posible remplazar la l por la media ponderada:

Las recomendaciones para obtener el valor del coeficiente de amplificación debido a la topografía, se anotan enseguida:

- Borde de cresta

Si se considera la cima C (Figura 5-13.) delimitado por una vertiente hacia debajo de pendiente i (Tangente del ángulo) y una vertiente hacia arriba de pendiente i, si:

$H \geq 10$ m (H es la altura de la cresta desde la base del relieve)

$$i \leq l / 3$$

el coeficiente τ toma los valores:

$$\tau = 1 \quad \text{para } l-i \leq 0.40$$

$$\tau = 1 + 0.8 (l-i - 0.40) \quad \text{para } 0.40 \leq l-i \leq 0.90$$

$$\tau = 1.40 \quad \text{para } l-i \geq 0.90$$

Los escenarios de sismos que se consideraron fueron las aceleraciones asociadas con diferentes periodos de retorno y probabilidad de ocurrencia en un periodo de 50 años, como se presentan en la Tabla 5-12. En este caso se utilizó el modelo de probabilidad de Poisson, en el cual la probabilidad de de ocurrencia del sismo está dada por la siguiente expresión:

$$p(S) = 1 - \exp\left(-\frac{n}{Tr}\right)$$

Donde T_r es el periodo de retorno del sismo, el cual se determina de la frecuencia media de un sismo de determinada magnitud, y n es el periodo de diseño.

Periodo de retorno	Aceleración (g)	Probabilidad de ocurrencia
10	0.063	0.993
50	0.107	0.632
100	0.142	0.393
475	0.280	0.099
1000	0.378	0.048

Tabla 5-12. Escenarios de sismo con su respectiva aceleración y probabilidad de ocurrencia en 50 años.

Asumiendo que los eventos de lluvia y de sismo son independientes, la probabilidad de que se generen los escenarios combinados con estos dos eventos es el producto de las probabilidades de cada uno de ellos, las cuales se definen en la Tabla 5-14.

		Condición estática	Periodo de retorno de los sismos				
			10	50	100	475	1000
Periodos de retorno de las lluvias	5	0.999	0.992	0.631	0.393	0.099	0.048
	10	0.995	0.988	0.629	0.391	0.099	0.048
	25	0.870	0.864	0.550	0.342	0.086	0.042
	50	0.636	0.632	0.402	0.250	0.063	0.305
	70	0.513	0.509	0.324	0.202	0.051	0.025
	90	0.428	0.415	0.264	0.164	0.041	0.020
	100	0.395	0.392	0.250	0.155	0.039	0.019

Tabla 5-13. Probabilidad de ocurrencia de los escenarios de lluvia y sismo.

5.11.2 Estimación de la amenaza

La amenaza se definió como la probabilidad anual de ocurrencia de diferentes niveles de magnitud del flujo de acuerdo con los criterios que se presentan en la Tabla 5-15.

Para determinar la probabilidad en cada celda, se determinó para cada periodo de retorno el valor de los parámetros de análisis, con lo que se determinó, a su vez, por interpolación lineal el valor de la probabilidad de ocurrencia de los valores críticos. El mapa de amenaza presenta la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de esos valores.

Parámetro	Límites	Observaciones	Vulnerabilidad Física de personas
Altura de agua (m)	$h < 0.1$ m	Altura asumida para indicar la posibilidad de que al predio llegue el agua.	0.0
	$0.1\text{m} < h < 0.5$ m	0.5 m altura propuestas por Lui & Lei para separar baja y media amenaza	0.01
	$0.5\text{m} < h < 0.8\text{m}$	0.8 m altura en que se empiezan a afectar todos los bienes sobre mesas	0.05
	$0.8\text{m} < h < 1.0\text{m}$	1.0 m altura en que comienzas a presentarse daños estructurales	0.10
	$h > 1.0$ m		0.50
Velocidad (m/s)	$v < 1.0$ m/s	Valores utilizados en Suiza, según lo reportado por García et al. (2003).	0.01
	1.0 m/s < $v < 1.5$ m/s		0.10
	$v > 1.5$ m/s		0.50
vh (m ² /s)	$vh < 0.5\text{m}^2/\text{s}$	Valores utilizados en Suiza, según lo reportado por García et al. (2003).	0.05
	$0.5\text{m}^2/\text{s} < vh < 1.0\text{m}^2/\text{s}$		0.1
	$1.0\text{m}^2/\text{s} < vh < 1.5\text{m}^2/\text{s}$		0.5
	$vh > 1.5\text{m}^2/\text{s}$		0.8
$F = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	$F < 0.6$	Valores sugeridos por Cubillos, en donde se establecen cambios significativos en el régimen del flujo.	0.01
	$0.6 < F < 1.0$		0.1
	$F > 1.0$		0.5

Tabla 5-15. Criterios de amenaza.

5.12 Evaluación de la vulnerabilidad

5.12.1 Vulnerabilidad física

Con la revisión bibliográfica realizada se decidió hacer una parte de la valoración de daños por medio de la metodología planteada por Kelman, en la cual se trabaja con las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas y se convierten en un prisma de presiones sobre las paredes de la edificación y por otra parte se complementa con la metodología planteada por Sánchez Silva en la que relaciona derivas con niveles de daño.

Metodología de evaluación de daño [Ilan Kelman, 2002]

Esta metodología evalúa las diferentes acciones que un flujo impone sobre una edificación, entre las cuales se destacan:

1. Acciones hidrostáticas:

Generadas por la presión lateral impuesta por la profundidad del flujo que rodea la vivienda o los componentes de la vivienda es:

$$\Delta P = \rho_w \times g \times (f_{diff} - y) \text{ donde } y = 0 - \rho_w g y \text{ para } b \leq y \leq f_{diff} \quad [5-3]$$

Además de esta acción también se considera como una acción hidrostática la Capilaridad ya que de ella depende el daño de los elementos existentes dentro de la casa y el daño de algunos elementos estructurales que estén fabricados con materiales retenedores de agua.

2. Acciones hidrodinámicas:

Las acciones contemplan cinco acciones, tres de ellas relacionadas con la velocidad (incluida la turbulencia) y dos relacionadas con las ondas.

La presión lateral impuesta por un flujo alrededor de una edificación, puede ser tomada como $\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2$. Este valor es la primera aproximación para representar la presión dinámica ejercida por un fluido.

Los cambios en la velocidad y las diferencias de presión, ocurren cuando el fluido se encuentra con las esquinas de la edificación, esto genera fenómenos de turbulencia que producen grandes impactos de manera local en la estructura.

La acción del oleaje (ondas suaves), puede simplemente aumentar o disminuir las presiones y las fuerzas totales impuestas en la vivienda en un 40%, lo cual depende del periodo de la onda. Respecto a la acción de las ondas de impacto, la función de presión se muestra en la Figura 5-14.

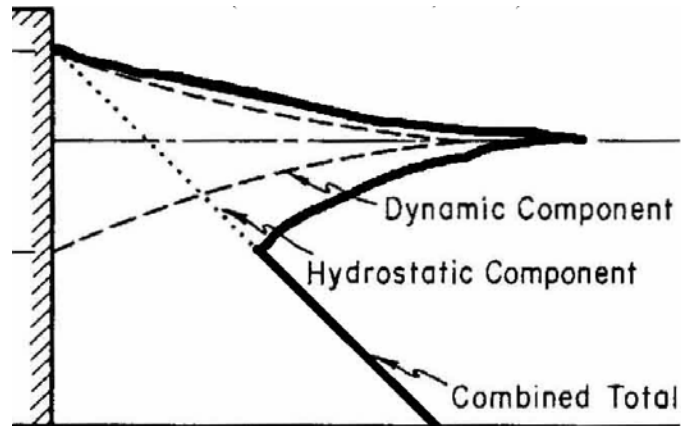


Figura 5-14. Función de presión para la acción de ondas de impacto (Tomado de USACE,1984).

3. Erosión:

El movimiento del agua puede causar erosión a lo largo de su viaje por lo cual se genera un alto transporte de sedimentos lo cual hace que el fluido cambie su densidad.

4. Fuerzas de Flotación:

Este tipo de fuerzas puede afectar completamente o parte de la residencia, depende de la densidad del flujo, y de las condiciones estructurales de la edificación.

Metodologías para la evaluación de vulnerabilidad de centros urbanos (Sánchez Silva M., Yamín I., Cardona O.D.)

La metodología se basa en el desarrollo de “curvas de daño”. Su objetivo principal es determinar, para cada tipo estructural previamente definido, el desplazamiento de fisuración o fluencia y el último. Cada estructura por su parte, esta representada por un valor de periodo fundamental. La metodología esta dirigida

básicamente a estructuras con las siguientes características: un número de pisos inferior a diez, destinadas a vivienda u oficina, regulares en planta y en altura, luces similares y altura de entrepiso entre 2.20 y 3.00m.

El procedimiento de este trabajo consistió en buscar el mayor número de ensayos de laboratorio posibles sobre estructuras de mampostería, sistemas aporticados, sistemas duales y sistemas prefabricados. En cada uno de ellos, se determinó el desplazamiento, medido como porcentaje de la altura en la cubierta, para el cual la estructura llegó a los estados límites de fisuración o fluencia y último. En este procedimiento se estudiaron ensayos realizados en diversos países como Colombia, Nueva Zelanda, Yugoslavia, China y Perú entre otros. Sobre la mampostería se obtuvo la mayor cantidad de información.

Los resultados indican que las derivas de fisuración para los diferentes sistemas estructurales, en porcentaje de la altura total medidos en cubierta, son: mampostería 0.10%, sistemas prefabricados 0.15% y para sistemas aporticados y sistemas duales 0.60%. Por su parte las derivas últimas son: 0.50% para mampostería, 0.60% para sistemas prefabricados y 2.0% para sistemas aporticados y duales de concreto reforzado. Los periodos estructurales aproximados, utilizados en este estudio se adoptaron de la CCSR – 84 y de diferentes estudios. En la Tabla 5-14, se muestran los valores empleados. Los anteriores valores permiten definir los valores medios de las curvas de daño por medio de las ecuaciones mostradas en la Tabla 5-15.

Las estructuras son clasificadas en tres categorías: buena, regular y mala calidad, para esto se tiene en cuenta la desviación estándar de los resultados obtenidos. En la Figura 5-15 se muestran las curvas para mampostería.

TIPO ESTRUCTURAL	FÓRMULA DEL PERIODO
<i>Mampostería</i>	$T_a = 0.055 * N$
<i>S. Prefabricados</i>	$T_a = 0.035 * N$
<i>S. Aporticados</i>	$T_a = 0.085 * H^{3/4}$
<i>S. Duales</i>	$T_a = 0.061 * H^{3/4}$

Tabla 5-14. *Periodos Estructurales Aproximados (Donde T_a : Periodo aproximado en segundos; H: Altura en metros; N: Número de pisos)*

TIPO ESTRUCTURAL	CURVA DE FISURACION O FLUENCIA	CURVA DESPLAZAMIENTOS ULTIMOS
<i>Mampostería</i>	$F_m = 0.26 * N$	$U_m = 1.30 * N$
<i>S. Aporticados o S. Duales</i>	$Y_c = 1.56 * N$	$U_c = 5.20 * N$
<i>S, Prefabricados</i>	$F_p = 0.40 * N$	$U_p = 1.70 * N$

Tabla 5-15. Ecuaciones de las Curvas de Daño para $h=2.60$ m. (Donde N: Número de pisos; h: Altura de entrepiso. F_m : Desplazamiento de fisuración para mampostería; Y_c : Desplazamiento de Fisuración para Pórticos, F_p : Desplazamiento de fisuración para Sistemas prefabricados; U_c : Desplazamiento último para sistemas prefabricados)

Para la evaluación de pérdidas, se superponen el espectro de desplazamiento del sismo medido en superficie y las curvas definidas en la Tabla 5-15 para cada tipo estructural.

Puesto que éste representa los desplazamientos de un sistema de un grado de libertad, es necesario tener el desplazamiento de la estructura medido en la cubierta.

Por otro lado, el CCSR-84 especifica que para evaluar la respuesta estructural de edificaciones de más de dos pisos deben incluirse por lo menos los tres primeros modos o todos aquellos con periodos superiores a 0.4seg. Por este motivo y considerando que se requiere estimar la respuesta en forma aproximada, en este estudio se considera únicamente el primer modo (Figura 5-16). De acuerdo a lo anterior, para encontrar los desplazamientos verdaderos, de una estructura que vibra de acuerdo a un cierto modo, los desplazamientos modales deben multiplicarse por un factor que es función del modo de vibración y de la matriz de masa de la estructura (Figura 5-16). La ecuación 5-4 muestra la determinación de dicho factor.

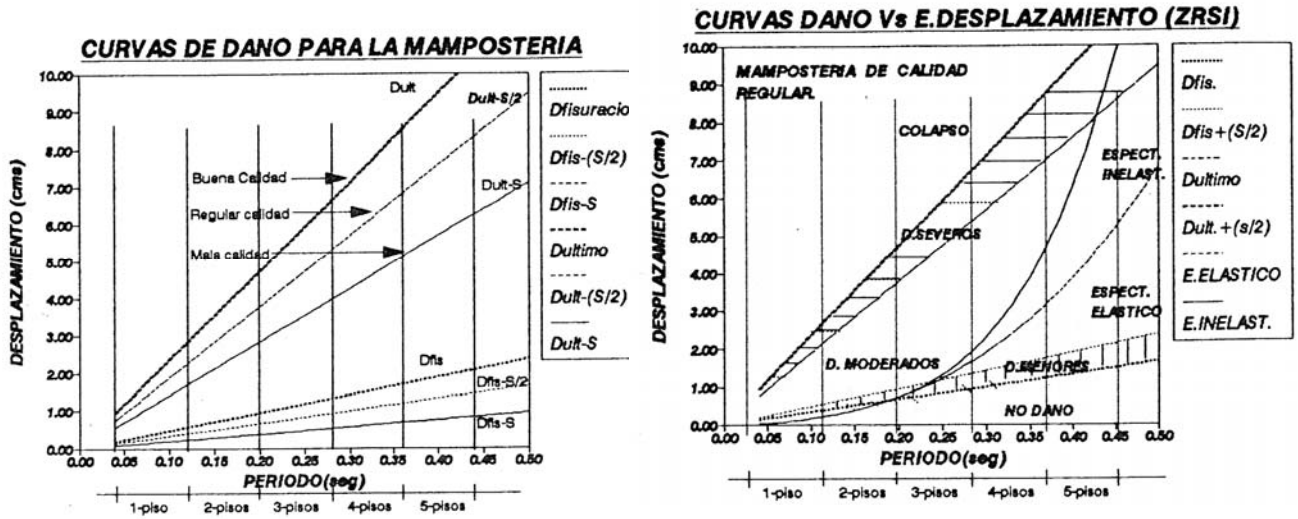


Figura 5-15. Curvas de Daño.

$$Y = \frac{\{\phi\}^T [M]}{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}} S_d \quad [5-4]$$

Donde $\{\phi\}$ representa el vector de desplazamientos modales, $[M]$ la matriz de masa de la estructura y S_d el desplazamiento espectral. Una vez multiplicado el espectro elástico de desplazamiento por este factor, se debe estudiar el comportamiento inelástico de la estructura con el fin de determinar su condición última. Suponiendo un comportamiento estructural elastoplástico, el espectro inelástico se obtendrá con base en la teoría de la conservación de la energía. Fundamentalmente se trata de disipar la energía elástica exigida por el sismo a través de deformaciones inelásticas.

MODOS DE VIBRACION EMPLEADO EN EL ANALISIS

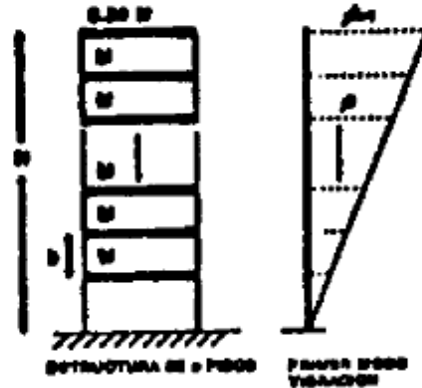


Figura 5-16. Modo de vibración.

El procedimiento para evaluar el espectro de desplazamiento del evento que se va a superponer a las curvas de daño, se puede resumir de la siguiente forma:

- Calcular el espectro de desplazamiento del sismo en superficie por métodos tradicionales.
- Multiplicarlo por el factor obtenido en la ecuación 5-4.
- Si este supera la curva de fisuración o fluencia de la estructura, se debe calcular el espectro inelástico como se describió anteriormente.

Por último, para el análisis modal, el CCCSR-84 permitía utilizar periodos estructurales, superiores en un cuarenta por ciento, a los calculados en forma aproximada para la definición de las curvas de daño. De esta forma, se supuso que todas las edificaciones de n-pisos, se encuentran localizadas dentro de un rango de periodos cuyo valor medio es 1.4 veces el periodo aproximado calculado de acuerdo con Tabla 5-15.

Para el cálculo de las pérdidas se definieron cinco estados de daño que siguen básicamente los siguientes criterios: *no daño*, *daños menores*, *daños moderados*, *daños severos* y *colapso*.

- *No daño*: Estructuras sin ningún tipo de daño. Edificación segura.
- *Daños menores*: Daños leves no estructurales; pequeñas grietas en las paredes. Edificación Segura.

- *Daños moderados:* Existencia de algunos elementos estructurales agrietados o rotos. Daños estructurales leves. Edificación posiblemente segura, requiere de una evaluación detallada.
- *Daños severos:* Muros muy dañados; gran número de elementos estructurales dañados o en mala condición. El colapso es esperado en eventos posteriores. Edificio inseguro, la edificación debe ser evacuada.
- *Colapso:* Colapso parcial o total de la edificación. Daños irreparables en la edificación.

Para el caso de la mampostería los estados de daño se definen como:

TIPO DE DAÑO	RANGO DE DESPLAZAMIENTO
No Daño	$D_{esp} < D_f$
Daños Menores	$D_f < D_{esp} < D_f + D_{sf}$
Daños Moderados	$D_f + D_{sf} < D_{esp} < D_u$
Daños Severos	$D_u < D_{esp} < D_u + D_{su}$
Colapso	$D_u + D_{su} < D_{esp}$

Tabla 5-16. Tipos de Daño para edificaciones en mampostería. (Donde D_{esp} : Desplazamiento Espectral. D_u Desplazamiento último para la estructura. D_f : Desplazamiento de fisuración para la estructura. D_{sf} : Media desviación estándar de fisuración. D_{su} : Media desviación estándar última).

Combinación de metodologías

Para las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas se plantean diferentes alturas de lámina de agua con lo cual se proponen diferentes presiones sobre los muros de las edificaciones, tanto la altura del flujo como la velocidad, ejercen una presión sobre el muro, que para efectos de simplificación del problema puede convertirse

en altura del fluido (las densidades del fluido cambian dependiendo de la concentración de sedimentos).

Expresiones de presión para cada uno de los escenarios:

$$H \rightarrow P = \frac{\gamma^* H}{2} \quad [5-5]$$

$$V \rightarrow P = \frac{\rho^* v^2}{2} \quad [5-6]$$

$$H \text{ y } V \rightarrow P = \frac{\gamma^* H}{2} + \frac{\rho^* v^2}{2} \quad [5-7]$$

Expresiones en función de la altura del fluido:

$$H \rightarrow H_f = \frac{P}{\gamma_f} = \frac{H}{2} \quad [5-8]$$

$$V \rightarrow H_f = \frac{P}{\gamma_f} = \frac{v^2}{2 * g} \quad [5-9]$$

$$H \text{ y } V \rightarrow H_f = \frac{P}{\gamma_f} = \frac{H}{2} + \frac{v^2}{2 * g} \quad [5-10]$$

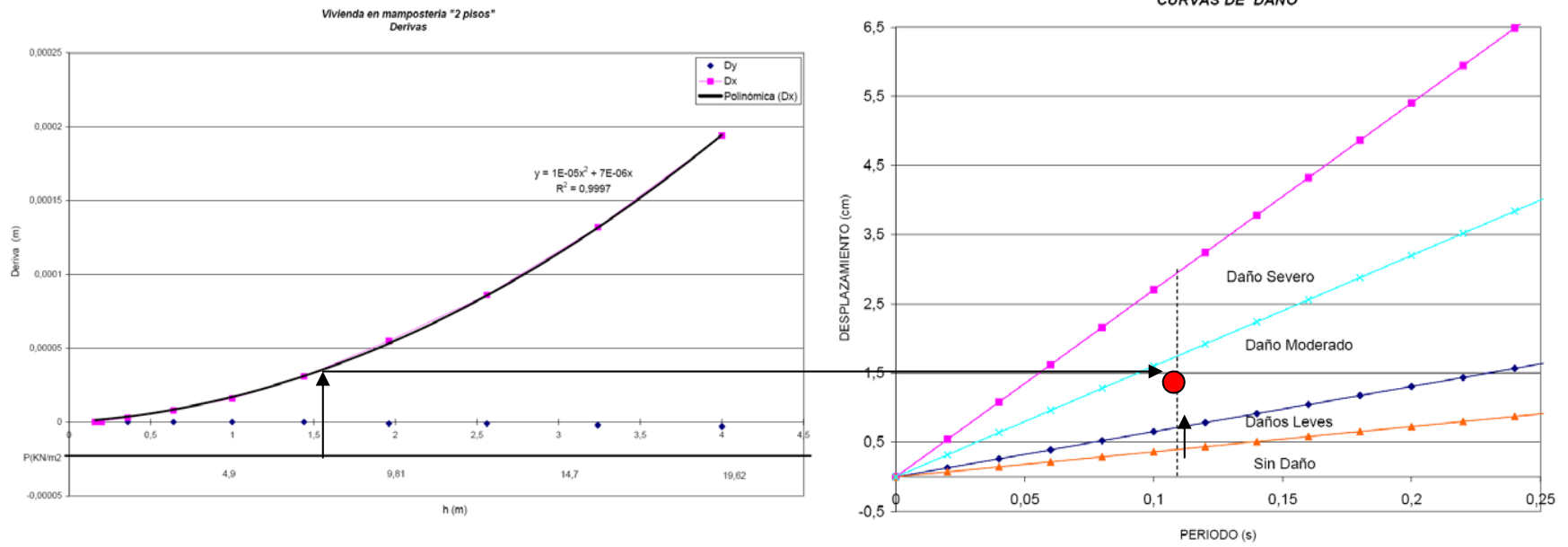


Figura 5-17. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad física

De esta forma todas las presiones se relacionan con una altura de fluido, para esto se toman intervalos de presión, y cada una de las presiones se aplican a las viviendas para obtener una relación entre las presiones aplicadas con las deflexiones obtenidas en la vivienda. En este punto entra el trabajo de Sánchez Silva donde con la relación de los desplazamientos y los niveles de daño se establecen porcentajes de daño acordes con los desplazamientos.

Al implementar estas dos metodologías se obtienen dos tipos de gráficas (ver Figura 5-17.), la primera relaciona presión, altura de lámina de agua y deriva y la segunda relaciona deriva y nivel de daño. Esto se evalúa para cada tipo de estructura vale la pena destacar que la limitante de esta metodología radica en la heterogeneidad de las condiciones de rigidez y cargas de las viviendas.

Finalmente de las curvas de daño y el periodo se establecen los intervalos en los cuales se da el porcentaje de daño, esto va cambiando dependiendo del tipo y periodo de cada estructura, como se muestra en la Figura 5-18.

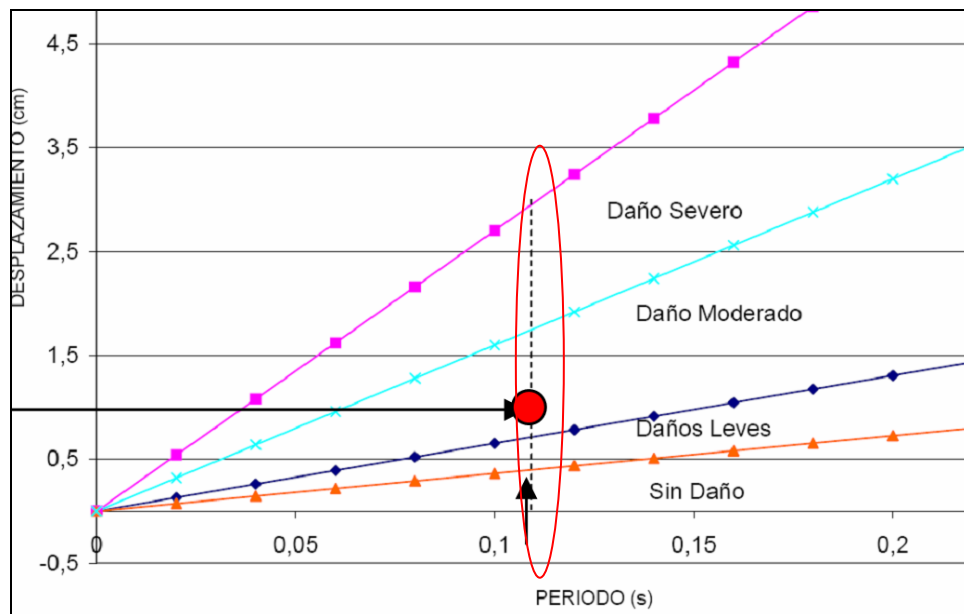


Figura 5-18. Intervalos de daño

5.12.2 Vulnerabilidad social

De acuerdo con el marco conceptual propuesto por Bikerman (2006) y adoptado en el presente estudio, la estimación de la vulnerabilidad social, a partir de indicadores, debe seguir las siguientes etapas:

1. Obtención de datos básicos
2. Procesamiento de la información para obtener las variables
3. Determinación del indicador
4. Determinación de los índices

Con relación a cada una de estas etapas se pueden definir las actividades, procedimientos y herramientas necesarias, estas se presentan a continuación:

1. Obtención de datos básicos

La información básica requerida se obtuvo a partir de fuentes primarias y secundarias. La comunidad y las instituciones de la localidad se constituyeron en la fuente primaria de la información, la cual se recolectó a partir de entrevistas focalizadas a los líderes de la comunidad, de talleres o entrevistas grupales por barrio y con trabajo de campo consistente en observación, valoración y clasificación de predios. Por su parte las fuentes secundarias fueron los informes, estudios y en general toda información obtenida de documentos que se identificaron y recolectaron en las diferentes instituciones distritales. Entre las principales fuentes de información secundaria con que se contó están las fichas catastrales de los predios y las fichas censales que fueron levantadas en el año 2005. A continuación se describe de manera general el procedimiento utilizado para la adquisición de la información de cada fuente.

1.1. Entrevistas focalizadas

Como primera actividad en la obtención de la información se hizo el reconocimiento de campo de los diferentes barrios y su comunidad. Esta actividad además de identificar y ubicar a los líderes de la comunidad fue importante como socialización y acompañamiento al equipo técnico durante todo el trabajo de campo que se ejecutó durante el desarrollo del proyecto. En el Anexo B-3 se presenta una descripción narrativa del trabajo de campo para la

identificación de los líderes y de las entrevistas que se les hizo, las cuales se guiaron a través del formato que se diseñó con este fin, el cual también se presenta en el Anexo B-3.

Las entrevistas fueron dirigidas a los presidentes de las Juntas de Acción Comunal, bajo la premisa de considerar que ellos son los que lideran a la comunidad. Los objetivos planteados para esta actividad fueron:

1. Obtener información relativa a la problemática del sector, en materia de riesgos por inundaciones y flujos torrenciales.
2. Indagar acerca de las expectativas e intereses comunitarios, frente al estudio que se realiza por parte de la Universidad Nacional y el FOPAE, en materia de gestión de riesgos.
3. Identificar elementos de información que permitan establecer el grado de percepción del riesgo por parte de la comunidad.

La ejecución de las entrevistas se basó en las siguientes premisas:

1. Reunión con el presidente de la JAC, sin presencia de los demás miembros.
2. Realización de la entrevista, preferiblemente en la residencia del entrevistado.
3. Toma de apuntes en diario de campo del entrevistador sin utilización de grabadora.
4. Realización de la entrevista estrictamente por parte de los profesionales en Gestión Social del grupo de trabajo de la Universidad Nacional.
5. Intercambio de las notas tomadas para contar con la aprobación y autorización del entrevistado en relación con sus respuestas.

Los elementos fundamentales de los cuales se buscaba la visión del presidente de la junta se resumen en los siguientes, por otra parte, en el formato anexo se pueden observar las preguntas guías empleadas por los entrevistadores:

1. Antecedentes
 - a. Antigüedad del presidente en la junta
 - b. Condiciones de legalización del barrio
 - c. Organismos de apoyo y su funcionamiento dentro del barrio
2. Memoria histórica del barrio
 - a. Proceso de formación
 - b. Proceso de legalización
 - c. Actividades y actores sobre el tema de riesgos
 - d. Eventos de inundación y flujos ocurridos y respuesta comunitaria
 - e. Relación entre la comunidad y el Río San Cristóbal
3. Situación de riesgo
 - a. Actividades masivas
 - b. Sitios de concentración de población y su vulnerabilidad
 - c. Identificación y reacción frente riesgos potenciales relacionados con el río
 - d. Reacción frente a eventos anteriores relacionados con el río

En total se hicieron 22 entrevistas, de cuyo análisis se hizo un diagnóstico conceptual de la situación social frente a procesos de inundación y flujos en la parte alta del Río San Cristóbal, este diagnóstico se incluye como parte del Anexo B-4. En la Tabla 5-17 se presenta una relación de los líderes comunitarios que fueron entrevistados.

ENTREVISTADO	FECHA ENTREVISTA	BARRIO
Sr. Reynaldo Vanegas Guardabosque EAAB	Enero 12 de 2007	Zona Rural Sector El Delirio
Sra. Cecilia Leon	Enero 30 de 2007	Zona Rural Sector El Delirio
Sr. Luis Arturo Riaño	Enero 30 de 2007	Quinta Ramos
Sr. Luis Barón	Febrero 4 de 2007	Las Amapolas
Sra. Gilma Camargo	Febrero 10 de 2007	La Gran Colombia
Sr. José Joaquín Ortiz Hernández	Febrero 23 de 2007	Santa Ana Sur
Sra. Luz Mary Madrid Becerra Sr. Rafael Ramírez	Febrero 24 de 2007	La Cecilia
Sr. Luís Antonio Gaitán	Febrero 24 de 2007	Corinto
Sr. José Maria Torres Sra. Luz Marina Bohórquez	Marzo 3 de 2007	Aguas Claras
Sra. Isabel Suárez	Marzo 3 de 2007	Conjunto San Cristóbal II
Sr. Elil Hernán Parra Piñeros	Marzo 31 de 2007	San Cristóbal Sur
Sr. José Niño Velandía	Marzo 31 de 2007	Nariño Sur
Sr. Pablo Emilio Bustamante	Marzo 31 d 2007	Calvo sur
Sr. Julio Alberto Ángel	Marzo 31 de 2007	San Blas I
Sr. Fabio Hueso	Abril 21 de 2007	Buenos Aires

ENTREVISTADO	FECHA ENTREVISTA	BARRIO
Sr. Leonardo Rodríguez Sr. Alfonso Guayazán Veloza	Abril 21 de 2007	Ramajal
Sr. Ernesto Casallas Sánchez	Abril 22 de 2007	San Pedro
Sr. Jorge Enrique Pacheco Caro	Abril 22 de 2007	San Blas II
Sr. Rubén Darío Becerra	Abril 28 de 2007	Triángulo Alto
Sr. Freddy Molina	Abril 28 de 2007	Triángulo Bajo
Sr. Iván Camilo Garay	Mayo 5 de 2007	Montecarlo
Sr. Hernando Lombana	Mayo 5 de 2007	El Sosiego

Tabla 5-17. Relación de líderes comunitarios.

1.2. Talleres comunitarios

Con el fin de obtener la visión de la comunidad en relación con los riesgos asociados con inundaciones y flujos en la parte alta del Río San Cristóbal, se organizaron reuniones con la comunidad de cada uno de los barrios incluidos en la zona de afectación potencial. Debido a las dificultades en relación con la falta de interés y poca participación de la comunidad en este tipo de actividades, no se hizo una selección de las personas a entrevistar, por el contrario se hizo convocatoria pública en cada barrio, a través de perifoneo, carteles y por intermedio de los miembros de las Juntas de Acción Comunal.

La respuesta a esta convocatoria fue muy heterogénea, mientras para algunos barrios concurren un número importante de personas en otros la participación fue escasa. Esta respuesta fue incluida como un elemento de análisis en el Diagnóstico Social y en los indicadores para definir la vulnerabilidad social. En dos barrios, El Sosiego y Tibaque Urbano, por la falta de interés y su poca colaboración en la realización de las entrevistas, estas no se pudieron llevar a cabo, por lo que la información en ellos es escasa y el Índice de Vulnerabilidad poco confiable.

El objetivo principal de las entrevistas grupales, además de las planteadas para las entrevistas focalizadas, fue la obtención de información precisa y específica con relación a los indicadores que el modelo adoptado requiere y la sensibilización de la comunidad en relación con el compromiso y sentido de colaboración que debe tener frente a potenciales eventos desastrosos en su comunidad.

Para la captura de la información se diseñó un formato guía de entrevista cuyos elementos principales se resumen a continuación. Para las preguntas específicas formuladas a la comunidad, el formato empleado puede verse en el Anexo B-5:

1. Percepción del riesgo:
 - a. Reconocimiento de la amenaza
 - b. Vivencias previas de eventos de inundación y flujos
 - c. Identificación del potencial de ocurrencia de estos eventos en el sector y sus consecuencias
 - d. Identificación de la vulnerabilidad física del barrio frente a los eventos de inundación y flujos
 - e. Identificación de elementos de vulnerabilidad social del barrio frente a eventos desastrosos
 - f. Observación y monitoreo del río
2. Antecedentes
 - a. Historia el barrio
 - b. Proceso de formación y legalización del barrio
 - c. Antecedentes locales de eventos de inundación y flujos
 - d. Tipos de propiedad
3. Infraestructura
 - a. Servicios públicos
 - b. Centros y organizaciones de atención
 - c. Vías y comunicaciones
4. Aspectos económicos
 - a. Ocupación y fuentes de empleo local y externa
 - b. Comercio e industria
 - c. Fondos para la atención de emergencias
5. Aspectos educativos y de capacitación
 - a. Planes de estudio
 - b. Programas de capacitación y formación
6. Aspectos comunitarios
 - a. Centros y organizaciones comunitarias
 - b. Participación comunitaria
 - c. Compromiso y solidaridad comunitaria
 - d. Liderazgo
 - e. Seguridad
 - f. Salud
7. Aspectos ambientales
 - a. Relación entre la comunidad y su entrono (río, bosque etc.)
 - b. Actividades y programas de protección ambiental

Las entrevistas grupales fueron desarrolladas por los miembros del grupo de trabajo de la Universidad Nacional, bajo la orientación y coordinación de los profesionales en gestión comunitaria y social. Gracias a la participación de los

ingenieros en las entrevistas se tuvo la oportunidad de socializar algunos aspectos del estudio que estaba en ejecución en ese momento.

Como introducción al tema y como herramienta de sensibilización antes de iniciar con las entrevistas se presentó a la comunidad una charla sobre el tema de amenazas naturales y riesgo con énfasis en el tema de inundaciones y flujos de detritos.

Los formatos originales se presentan en el Anexo B-6, de estos se tomo la información necesaria para estimar los indicadores y para complementar el diagnóstico social. En cada entrevista se hizo una relación de las personas que participaron la cual se puede observar en el Anexo B-6.

1.3. Trabajo de campo

La información relacionada con la vulnerabilidad física, con el avalúo de predios comerciales, industriales y educativos, no está consignada en las fichas catastrales ni censales, por lo que hizo una campaña de trabajo de campo para hacer visita a cada uno de los predios y obtener la información relevante para la evaluación tanto de la vulnerabilidad física como la social. Igualmente a pesar de obtener alguna información de las empresas de servicios, la identificación, evaluación y valuación de las líneas vitales se hizo directamente en campo.

Las visitas de campo para obtener esta información se hizo por parte de los Ingenieros Civiles y Catastrales que hicieron parte del grupo de trabajo. Las fichas de inventario y evaluación de los parámetros requeridos se presentan en el Capítulo 8- Estimación del riesgo.

Los elementos principales que se identificaron en este trabajo de campo se resumen a continuación:

1. Tipo de edificación
2. Composición estructural
3. Calidad de construcción
4. Mantenimiento
5. Cuantificación del costo de bienes y mercancías
6. Población fija y flotante
7. Elementos de protección ante inundaciones y flujos
8. Capacidad y accesos a centros de atención
9. Cobertura de servicios públicos

1.4. Información secundaria

Algunos de los indicadores incluidos en el método para definición de la vulnerabilidad social requieren de datos precisos, los cuales deben ser obtenidos a partir de fuentes oficiales. En el presente proyecto se contó con las fichas catastrales para los predios dentro de la mayoría de los barrios, las cuales fueron suministradas por la Oficina de Catastro Distrital, sin embargo no fue posible obtener los datos para la zona de Ramajal.

La información consignada en estas fichas permite definir los elementos que se enumeran a continuación:

1. Estructura
 - a. Armazón
 - b. Muros
 - c. Cubierta
 - d. Conservación
2. Acabados principales
 - a. Fachadas
 - b. Cubrimiento muros
 - c. Pisos
 - d. Conservación
3. Baños
 - a. Enchapes
 - b. Mobiliario
 - c. Conservación
4. Cocina
 - a. Tamaño
 - b. Enchapes
 - c. Mobiliario
 - d. Conservación
5. Complementos

La otra fuente de información secundaria importante para el desarrollo de este proyecto fueron las fichas censales elaboradas por el DANE en el censo del año 2005. Desafortunadamente estas fichas no cuentan con información predio a predio sino que es compilada a nivel de unidad territorial, la cual tampoco está claramente definida en todos los casos, algunas veces corresponde a una manzana pero no siempre es así, de manera que los datos demográficos debieron ser promediados para ser utilizados en la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo social.

La información obtenida en las fichas censales está relacionada con datos generales de la población como sexo, edad, etc. Desafortunadamente no fue posible obtener toda la información del censo por lo que algunos indicadores no pudieron ser evaluados adecuadamente, sin embargo en las fichas de cada indicador se proponen las variables que pueden ser utilizadas para cuantificar los diferentes indicadores.

Otras fuentes de información fueron las instituciones distritales, en las cuales se obtuvo información valiosa para complementar el diagnóstico y elaborar los indicadores. Aunque se revisaron todas las instituciones, la información de mayor valor se obtuvo en las siguientes:

1. CAR: Planos y estudios ambientales
2. DPAE: Estudios puntuales y mapas temáticos
3. Ministerio de Medio Ambiente: Planos y estudios ambientales
4. DAMA: Estudios puntuales
5. EAAB: Estudios

La información pertinente para el objeto de estudio y para la estimación de la vulnerabilidad social en particular se presentó de manera resumida en el Capítulo 2-Antecedentes.

Es de resaltar que a pesar de ser instituciones oficiales y de haber solicitado la información de manera formal a través de la DPAE y en algunos casos a través de derechos de petición, no fue posible contar con toda la información existente.

2. Procesamiento de la información

Los datos obtenidos de las diferentes fuentes, tal como se explicó en el numeral anterior se consolidaron en forma de bases de datos, a partir de las cuales se obtuvieron las variables para definir los indicadores de vulnerabilidad social.

Una vez analizados los diferentes indicadores y sus variables de manera conjunta entre el grupo de trabajo de la Universidad Nacional y funcionarios de la DPAE, estos se replantearon quedando los que se muestran en la Tabla 5-18.

FACTOR Elemento	Nombre del Indicador	Variables/Factores
EXPOSICIÓN		
Estructuras	(E1) Número de unidades de vivienda	Número de unidades de vivienda. Porcentaje de viviendas con un solo piso.
	(E2) Líneas vitales	% de casas con suministro legal de agua potable.
Población	(E3) Población expuesta	Total de la población residente. Densidad de población. Crecimiento Urbano. Porcentaje de la población más vulnerable (niños, ancianos, discapacitados, etc.), Capacidad de respuesta de las entidades.
Económica	(E4) Actividades económicas locales.	% de área dedicada a comercio, estaciones de servicio, industria, instituciones y bodegas con respecto al total de área construida, ingresos per capita, porcentaje de producción con respecto al total de la zona de estudio (localidad), producción por economía informal, participación de la mujer en la producción económica.
VULNERABILIDAD		
Física/demográfica	(V1) Acceso a servicios básicos	% de viviendas con suministro legal de agua potable.
Social	(V2) Necesidades básicas insatisfechas.	Necesidades básicas insatisfechas (Acceso a servicios públicos, saneamiento básico).
	(V3) Nivel educativo	Nivel educativo. Acceso a campañas de información.
	(V4) Participación comunitaria	Proyectos comunitarios presentados ante instituciones. Organización Barrial. Indicadores de participación (GTZ).
Cultural	(V5) Actitud	Prioridad de la población para protegerse de la amenaza
	(V6) Percepción del riesgo	Frecuencia e intensidad de amenaza experimentada y esperada. Conocimientos del riesgo y sus causas.
Económica	(V7) Descentralización y Diversificación	Porcentaje del presupuesto total auto-generado Mezcla de sectores económicos para generación de empleo.
	(V8) Resiliencia económica	Fondos locales, ONG's. Oferta de servicios sociales en lo privado.
Ambiental	(V9) Negocios pequeños	% de negocios con menos de 20 empleados
	(V10) Degradación del medio	% de áreas sin cobertura. Asentamientos no

FACTOR Elemento	Nombre del Indicador	Variables/Factores
	ambiente	legales en zonas de alto riesgo. Gestión de residuos sólidos. Terreno sobre utilizado.
CAPACIDAD Y MEDIDAS Planeación física e ingeniería	(C1) Planeación del uso del suelo	Cumplimiento del Plan de Ordenamiento. Legalidad del barrio y de servicios públicos.
	(C2) Códigos de construcción	Cumplimiento de las normas de construcción
	(C3) Reforzamiento/mantenimiento	Reforzamiento aplicado y mantenimiento regular
	(C4) Manejo ambiental	Medidas que promueven conservación natural (Proyectos). Impacto y cobertura de los proyectos y programas de conservación ambiental. Importancia de estos proyectos. para la comunidad
	(C5) Obras públicas para mitigación del riesgo	Existencia de proyectos de inversión en obras de mitigación de riesgo. Participación comunitaria en estos proyectos.
Capacidad social	(C6) Sistema de alerta temprana	Frecuencia de programas de alerta comunal. Entendimiento y cumplimiento de protocolos de alerta.
	(C7) Plan escolar de gestión de riesgo	Elaboración e implementación de los planes escolares de riesgo.
	(C8) Simulacros de respuesta ante emergencias	Entrenamiento y simulacros de emergencia que se adelantan y su frecuencia.
	(C9) Participación comunitaria en la gestión del riesgo	Comité de emergencia con representantes de la comunidad (CLE). Capacidad de organización.
	(C10) Grupos de emergencia local	Grupos de emergencia barrial (Existencia, función, reconocimiento y capacidad). % de la población que hace parte de estos.
	(C11) Accesibilidad/Conectividad	Rutas de acceso y alteración funcional.
Capacidad institucional	(C12) Fondos de emergencia	Fondos locales para emergencia como % del presupuesto total. Periodo de desembolso de fondos nacionales. Acceso a fondos internacionales
Capacidad económica	(C13) Mercado de pólizas	Disponibilidad de seguros para edificaciones. Cobertura de predios con pólizas ante amenazas naturales.

FACTOR Elemento	Nombre del Indicador	Variables/Factores
Manejo y capacidad institucional	(C14) Subsidios para mitigación y reconstrucción	Existencia y disponibilidad de subsidios para medidas de reducción de riesgo. Existencia y disponibilidad de subsidios para reconstrucción
	(C15) Organización institucional	Existencia y funcionamiento del Comité de Emergencia. Capacitación institucional. Comunicación.
	(C16) Mapa de riesgo	Disponibilidad y circulación de mapas de riesgo. Interés de la comunidad. Socialización del mapa. Alcances del análisis de riesgo.
	(C17) Plan de emergencia	Disponibilidad de planes de emergencia. Interés de la comunidad. Socialización del plan.

Tabla 5-18. Indicadores propuestos para evaluar la vulnerabilidad social.

Los valores y criterios utilizados se consignan en las fichas de análisis de los indicadores que se presenta en el Anexo B-7. A continuación, en la Tabla 5-19. se hace una breve reseña de los criterios adoptados para cada uno de ellos. En las fichas del anexo se puede ver con mayor detalle la información y análisis que se hizo para cada uno de los indicadores.

INDICADOR	INFORMACIÓN BÁSICA	VARIABLES
(E1) Número de unidades de vivienda	Inventario de predios, su caracterización y clasificación	Número de unidades de vivienda expuestas a la amenaza. Porcentaje de viviendas con un solo piso.
(E2) Líneas vitales	Relación de predios con suministro de agua potable % de cobertura del agua potable legalizado	% del barrio con servicio legal de agua potable
(E3) Población expuesta	Censo de población	Total de la población residente. Densidad de población. Crecimiento Urbano. Porcentaje de la población más vulnerable (niños, ancianos, discapacitados, etc.), Capacidad de respuesta de las entidades.
(E4) Actividades económicas locales	Inventario de predios económicamente productivos en términos de comercio e industria, Locales y negocios informales. Distribución de la producción por barrio.	% del área dedicada a comercio, estaciones de servicio, industria, instituciones y bodegas con relación al área total construida. Ingresos per capita. Porcentaje de la producción local con relación al total de la zona de estudio (localidad). Producción por economía informal. Participación de la mujer en la producción económica.
(V1) Acceso a servicios básicos	Relación de predios con suministro de agua potable % de cobertura del agua potable legalizado	% de viviendas con suministro legal de agua potable.
(V2) Necesidades básicas insatisfechas		
(V3) Nivel educativo	Censo de población.	Nivel educativo. Acceso a campañas de información.
(V4) Participación comunitaria	Banco de proyectos radicados en las instituciones. Identificación de la organización barrial y la participación de la comunidad en esta.	Proyectos comunitarios presentados ante diferentes instituciones. Organización barrial. Indicadores de participación.
(V5) Actitud	Identificación de los problemas más importantes según la propia comunidad	Prioridad de la población para protegerse de la amenaza.
(V6) Percepción del riesgo	Indagar sobre experiencias pasadas relacionadas con el tipo de amenaza y sobre la potencial ocurrencia en el sector.	Frecuencia e intensidad de amenaza experimentada y esperada. Conocimiento del riesgo y sus causas.
(V7) Descentralización y diversificación	Inventario de predios dedicados a actividades productivas y su participación en la producción local.	Porcentaje del presupuesto total auto-generado. Mezcla de sectores económicos para la generación de empleo.
(V8) Resiliencia económica	Existencia y accesibilidad a fondos de emergencia a nivel local, nacional e internacional	Fondos locales. ONG'S. Oferta de servicios sociales privado.
(V9) Negocios pequeños	Inventario y caracterización de predios con actividades	% de los negocios dentro del barrio con menos de 20

INDICADOR	INFORMACIÓN BÁSICA	VARIABLES
	económicamente productivas.	empleados
(V14) Degradación ambiental	Mapa de coberturas Identificación de predios con áreas cubiertas por bosques Identificación y manejo de residuos líquidos y sólidos	% de área sin cobertura. Asentamientos no legales en zonas de alto riesgo. Gestión de residuos sólidos. % de terreno sobre utilizado.
(C1) Planeación del uso del suelo	Plan de Ordenamiento Territorial Verificación de campo con relación al cumplimiento del POT con relación a usos del suelo, normas de construcción etc.	Cumplimiento del Plan de Ordenamiento Territorial. Legalidad del barrio y de servicios públicos.
(C2) Códigos de construcción	Código de construcción local Verificación en campo del cumplimiento de la normatividad vigente	% de las construcciones que cumplen con el código de construcción
(C3) Reforzamiento/mantenimiento	Inventario y caracterización de las estructuras principalmente las institucionales y obras de infraestructura	Medidas de reforzamiento y mantenimiento estructural en edificios institucionales y obras de infraestructura
(C4) Manejo ambiental	Identificación de proyectos y actividades de protección ambiental	Medidas que promueven la conservación natural (proyectos). Impacto y cobertura de los proyectos y programas de conservación ambiental. Importancia de estos proyectos para la comunidad.
(C5) Obras públicas para la mitigación del riesgo	Identificación de planes de inversión en obras públicas para la mitigación del riesgo.	Existencia de proyectos de inversión en obras de mitigación de riesgo. Participación comunitaria en estos proyectos.
(C6) Sistema de alerta temprana	Verificar la existencia de sistema de alerta temprana y evaluar su correcta aplicación.	Frecuencia de programas de alerta comunal. Entendimiento y cumplimiento de protocolos de alerta.
(C7) Plan escolar de gestión de riesgo	Verificación de la elaboración, implementación y cumplimiento del plan escolar.	Elaboración e implementación de los planes escolares de riesgo
(C8) Simulacros de respuesta ante emergencias	Identificación de programas de simulacros de evacuación, comunicación, etc.	Entrenamiento y simulacros de emergencia que se adelantan y su frecuencia.
(C9) Participación comunitaria en la gestión del riesgo.	Identificación de los comités, grupos de trabajo, ONG's en los que hacen parte la comunidad Composición del CLE y representatividad de la comunidad en dicho comité Identificación de la eficiencia en la transmisión de la información y experiencias de las personas del CLE a la comunidad	Comité de emergencia con representantes de la comunidad (CLE). Capacidad de organización

INDICADOR	INFORMACIÓN BÁSICA	VARIABLES
(C10) Grupos de emergencia local	Identificación de la existencia o no de grupos de emergencia barrial	Grupos de emergencia barrial (Existencia, función, reconocimiento y capacidad). % de la población que hace parte de los grupos de emergencia
(C11) Accesibilidad/Conectividad	Identificación de las rutas de acceso al barrio y su condición. Indagar sobre antecedentes de bloqueos.	Rutas de acceso y alteración funcional
(C12) Fondos de emergencia	Existencia fondos locales, nacionales e internacionales de emergencia Accesibilidad de las localidades a dichos fondos de emergencia	Tiempo que demora la disponibilidad de recursos externos para atención de emergencias Velocidad de respuesta en términos de recursos económicos externos
(C13) Mercado de pólizas	Consulta en el mercado de seguros sobre cobertura con pólizas de los bienes ante eventos naturales.	Disponibilidad de seguros para edificaciones. Cobertura de predios con pólizas ante amenazas naturales.
(C15) Subsidios para mitigación y reconstrucción	Identificación de la existencia o no de ayudas financieras para labores de mitigación tales como mantenimiento	Existencia y disponibilidad de recursos financieros para mitigación, por ejemplo mantenimiento
(C16) Mapa de riesgo	Identificar la existencia del mapa de riesgo y de estudios sobre riesgos Identificación del conocimiento de la comunidad del mapa de riesgo y su interpretación	Existencia o no de mapa de riesgo Niveles en los que se ha socializado el mapa de riesgo Interés de la comunidad en el mapa de riesgo Alcances del análisis de riesgo Conocimiento por parte de la comunidad del mapa de riesgo
(C17) Plan de emergencia	Identificar la existencia de un plan de emergencia Identificación del conocimiento de la comunidad del plan de emergencia	Existencia o no de un plan de emergencia Socialización del plan de emergencia Conocimiento por parte de la comunidad del plan de emergencia

Tabla 5-19. Criterios adoptados para el análisis de indicadores.

3. Determinación de los indicadores y el índice de vulnerabilidad

El índice de Vulnerabilidad (IV) está compuesto por tres factores: la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad. La exposición a su vez está compuesta por cuatro indicadores, la vulnerabilidad por diez indicadores y la capacidad por diecisiete.

Los indicadores se obtuvieron a partir de la información básica procesada, de acuerdo con la variable o variables identificadas en cada caso y como se definieron en la Tabla 5-19. Con base en esta información y los rangos definidos para cada indicador se le asignó a cada uno un valor entre 1 y 3 de acuerdo con el rango establecido para las variables utilizadas, tal como se muestra en la Tabla 5-19.

Adicionalmente a cada indicador se le asignó un valor de peso o de ponderación, dependiendo de la importancia del indicador en la vulnerabilidad social. Los valores de peso se presentan en la Tabla 5-19.

El valor del Índice de Vulnerabilidad se obtiene como una función lineal, con valores entre 0 y 100, de la siguiente forma:

$$IV = W_{FE} \sum (W_{ind})_E \times (Cal_{ind})_E + W_{FV} \sum (W_{ind})_V \times (Cal_{ind})_V - W_{FCAP} \sum (W_{ind})_{CAP} \times (Cal_{ind})_{CAP}$$

En donde,

W_{FE} es el valor de peso del factor de exposición, W_{FV} es el valor de peso del factor de vulnerabilidad, W_{FCAP} es el valor de peso del factor capacidad. $(W_{ind})_E$ es el valor de peso de cada uno de los indicadores de exposición, $(W_{ind})_V$ es el valor de peso de cada uno de los indicadores de vulnerabilidad, $(W_{ind})_{CAP}$ es el valor de peso de cada uno de los indicadores de capacidad. $(Cal_{ind})_E$ es la calificación de cada uno de los indicadores de exposición, $(Cal_{ind})_V$ es la calificación de cada uno de los indicadores de vulnerabilidad, $(Cal_{ind})_{CAP}$ es la calificación de cada uno de los indicadores de capacidad.

Los valores de peso de cada factor e indicador se presentan en la Tabla 5-19.

Factor (W_F) Elemento (W_e)	Indicador (W_i)	Variables (Calificación)
EXPOSICIÓN		1/3
Estructuras	(E1) Número de unidades de vivienda	10
Población	(E2) Líneas vitales	10
	(E3) Población expuesta	15
Económica	(E4) Actividades económicas locales.	15
VULNERABILIDAD		1/3
Física/demográfica	(V1) Acceso a servicios básicos	10
Social	(V2) Necesidades básicas insatisfechas.	3
	(V3) Nivel educativo	3
Cultural	(V4) Participación comunitaria	4
	(V5) Actitud	3
Económica	(V6) Percepción del riesgo	7
	(V7) Descentralización y Diversificación	3
	(V8) Resiliencia económica	5
Ambiental	(V9) Negocios pequeños	2
	(V10) Degradación del medio ambiente	10
CAPACIDAD Y MEDIDAS		2/3
Planeación física e ingeniería	(C1) Planeación del uso del suelo	2
	(C2) Códigos de construcción	2
	(C3) Reforzamiento/mantenimiento	1
	(C4) Manejo ambiental	3
	(C5) Obras públicas para mitigación del riesgo	1
Capacidad social	(C6) Sistema de alerta temprana	3

Factor (W_F) Elemento (W_e)	Indicador (W_i)	Variables (Calificación)
Capacidad institucional	(C7) Plan escolar de gestión de riesgo	4
	(C8) Simulacros de respuesta ante emergencias	2
	(C9) Participación comunitaria en la gestión del riesgo	5
	(C10) Grupos de emergencia local	4
	(C11) Accesibilidad/Conectividad	4
	(C12) Fondos de emergencia	4
Capacidad económica	(C13) Mercado de pólizas	4
	(C14) Subsidios para mitigación y reconstrucción	5
Manejo y capacidad institucional	(C15) Organización institucional	4
	(C16) Mapa de riesgo	2
	(C17) Plan de emergencia	2

Tabla 5-20. Valores de peso de factores e indicadores

5.13 Valoración de los elementos expuestos

Es importante citar el desarrollo del catastro multipropósito², ya que por considerarse este tipo de proyectos de carácter investigativo, no sólo es significativa la obtención de los resultados por la coyuntura técnica sino implica trascender de acuerdo al avance tecnológico y las tendencias operacionales de las temáticas que implican multidisciplinariedad en los estudios técnicos.

² Los sistemas catastrales fueron establecidos principalmente con fines legales y/o fiscales, pero más de 31 países han indicado que la información catastral se utiliza para el manejo de servicios públicos, cartografía básica, valuación inmobiliaria, planeamiento del uso de la tierra y evaluación del impacto ambiental. **JURG KAUFMANN/DANIEL STEUDLER**. Comisión 7 del FIG CATASTRO 2014. Una visión para un sistema catastral futuro. Julio 1998. Pag 9.

La metodología propuesta supone una consideración particular como hecho metodológico en estudios de igual envergadura y es la recopilación de múltiples investigaciones que van desde la investigación directa de la oferta de mercado inmobiliario en la zona, hasta el contraste investigativo con la metodología de avalúos masivos desarrollada por la UACD, que permite seleccionar una muestra significativa de puntos de investigación que doten datos de carácter económico y otra de carácter físico con las variables descritas en el ítem anterior para determinar los valores de terreno y de construcción.

5.13.1 Avalúos masivos zonas urbanas

Según el artículo 73 de la resolución 2555 de 1988 del IGAC, existen un número de etapas para establecer el valor de los predios (...) El estudio que permite establecer el valor en el mercado inmobiliario de cada uno de los predios de una determinada región, comprende las etapas denominadas: identificación predial, determinación de zonas homogéneas geoeconómicas, determinación de valores unitarios para los tipos de edificación y liquidación de avalúos (...).

En el ítem anterior se definía metodológicamente la naturaleza de los datos obtenidos de las construcciones de la zona de estudio, para tipificarlas y caracterizarlas; pues bien, un trabajo alterno se desarrolla con la valoración de la tierra, sobre ella se consideran los aspectos topográficos, vías de acceso, posibilidades de transporte y en general de servicios básicos domiciliarios, así como la norma de uso del suelo que permite determinar la probabilidad o no de desarrollo urbanístico y/o económico para potenciar el valor del terreno.

Dicha investigación se realizó con apoyo de cartografía básica y determinación de zonas homogéneas física; Sin embargo no todos los valores que suministro la UACD, corresponden a la vigencia 2007 ya que no todos fueron objeto de actualización catastral en el año 2006, así que para ajustar el valor de la tierra de los predios no objeto de actualización, se les aplicó el IVIUR (Índice de valorización inmobiliaria urbano y rural)

Históricamente el reajuste a los avalúos catastrales del Distrito Capital se efectuaba a través de un índice resultado de una investigación estadística representativa del mercado inmobiliario nacional, cuya metodología debía ser aprobada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)³. Esta metodología fue modificada reajustando los avalúos catastrales cada año en

³ Ley 14 de 1983 Artículo 6.

un porcentaje no inferior al 40% ni superior al 60% de la variación del índice de precios de vivienda, calculado y elaborado por el mismo DANE⁴.

Grupo	IVIUR vigencia fiscal 2007
Residencial 1	5.9%
Residencial 2	5.9%
Residencial 3	7.9%
Residencial 4	10.0%
Residencial 5	11.0%
Residencial 6	11.0%
Comercial	5.9%
Industrial	5.9%
No Edificado	3.5%
Depósito y parqueadero	7.0%
Otros	5,0%

*Tabla 5-21. Índice de valoración inmobiliaria urbana y rural para la vigencia fiscal 2007.
Fuente: Secretaría de Hacienda de Bogotá*

Con la expedición de la Ley 6015 de 2000, se estableció un procedimiento especial para Bogotá, según el cual los avalúos catastrales de conservación se reajustarían anualmente en el porcentaje – el índice valoración inmobiliaria urbana y rural IVIUR - que determine y publique el Gobierno Distrital en el mes de diciembre de cada año, previo concepto del CONFIS.⁶

Para obtener el IVIUR, por recomendación del CONFIS, la Unidad Administrativa de Catastro Distrital y la Secretaría de Hacienda Distrital acogieron la metodología de la Muestra Maestra de Predios que es una muestra probabilística de predios de

⁴ Ley 14 de 1983 Artículo 75.

⁵ Ley 601 de 2000 Artículo 3.

⁶ Secretaría de Hacienda de Bogotá

la ciudad, por conglomerados, estratificada y bietápica, que prevé su realización anual durante 10 años consecutivos.

5.13.2 Avalúos de las zonas rurales

- **TECHO DEL VALOR AMBIENTAL:** El objetivo de esta metodología valuatoria radica en la cuantificación económica del beneficio ofrecido por una reserva natural bien por la pureza del aire que ofrece la cobertura vegetal o por el suministro natural de agua.

Así que el valor se determina por el valor de uso ambiental dado por los siguientes componentes:

1. Demanda por recursos hídricos. Se valora a través del método de Función de Daño o por la estimación del costo del recurso alternativo. Ej: cuánto le costaría a la EAAB reemplazar el agua de una fuente directa por otra. El agua es un bien que se puede valorar en función al costo de producirla y a través de este bien se puede estimar el valor de la cobertura vegetal de la zona protegida que la produce.
2. Demanda por la tierra vegetal (el concepto de la tierra vegetal no es claro y por el control de erosión. También se aplica el Método de Función Daño para conocer la pérdida de tierra vegetal ocasionada por la erosión a causa de perder la cobertura vegetal.
3. Ventajas de la biodiversidad en bosques naturales. Puede estimarse indirectamente por el Método del Costo de Viaje, mediante el turismo ecológico que genera la cobertura vegetal y la diversidad de fauna y flora generada.
4. Captura del CO₂ y producción de Oxígeno por la cobertura vegetal. Su cálculo es más difícil, pero algunos investigadores lo han estimado poniendo un precio al aire limpio.

La disponibilidad a pagar suele calcularse de manera directa a los ciudadanos, dando origen a una dinámica de mercado, bajo metodologías de investigación directa, p.ej. cuánto estaría usted dispuesto a pagar por estar con estas mismas condiciones en otro sitio.

- **EL PISO DEL VALOR AMBIENTAL:** Así como se pretende valorar el techo ambiental, se sugiere valorar el piso ambiental, y hace referencia al costo de oportunidad del predio, en virtud de su uso rural o agrícola. Dado que el propietario del predio rural debe darle una función social a la propiedad, y por tanto, frente a la obligatoriedad de protección, se imposibilita la producción agrícola, de explotación del recurso o de urbanización. Existe una evidente descompensación respecto al derecho de propiedad y su inhabilidad de amo y señor dueño del bien, así la sociedad debe compensar este cuidado por mantener y proteger el predio por su potencial ambiental y el beneficio general brindado.

Esta consigna es amparada y reglada en la norma; en primera instancia la función social de la propiedad en la constitución política de Colombia, y en segundo lugar por lo definido en la Ley de ordenamiento territorial 388 de 1997 en su artículo 48 (...) el derecho que tienen los propietarios de predios protegidos, tanto por razones arquitectónicas como ambientales, a que el Municipio los compense económicamente (...)

Esta cancelación se ve reflejada en el daño emergente ocasionado por la declaratoria y el lucro cesante por la no explotación productiva del bien.

Ahora bien se supone que debe existir un potencial de explotación de uso agrícola, o urbanístico si fuese el caso, por ello se incluye en la metodología el método de valor potencial, que se refiere a la identificación y asociación de las variables de:

- a. Fertilidad y condición agronómica,
- b. Relieve o topografía y
- c. Disponibilidad de aguas.

De acuerdo con este puntaje existirá mayor o menor productividad del suelo agrícola, y dependiendo de la productividad se le dará un valor comercial al predio.

Por tanto podrá hacerse una comparación con zonas con características similares pero no limitada en la explotación del recurso.

- **EL VALOR DE MERCADO AMBIENTAL (VMA):** El valor del mercado ambiental se va a definir como el precio para establecer una transacción económica, no obstante difiere del valor comercial de áreas normales (sin tratamientos especiales de protección u otros), ya que tiene implícito un potencial valorativo por la connotación de la protección del patrimonio ambiental, para beneficio de toda una comunidad.

Es claro que lo que se está evaluando es el terreno y no el aire, el agua, etc, pero si se comparan las metodologías avaluatorias de predios urbanos para transacciones comerciales, se logra identificar variables como: potencialidades de

desarrollo en la zona, ya sea por la ampliación o mejoramiento de los servicios públicos o de su infraestructura, probabilidades de construcción en altura o no, etc., que en su conjunto determinan variables que afectan positivamente o no el valor del terreno.

Por tanto el contraste para la determinación del valor ambiental de los predios en zonas rurales afectadas por protección, a mi juicio está determinado no sólo por la capacidad agrícola (valor del techo y piso ambiental) del suelo sino por el valor social que le aporta el área a la comunidad.

Esta valoración social es inversamente proporcional a la intervención del hombre, es decir, un área tendrá mayor valor social en la medida que sea la menos intervenida por el hombre, de manera recíproca, las plantaciones forestales (fines netamente comerciales) tendrán un significativo, casi inexistente valor social.

Bajo estos términos se podría indicar que el valor de mercado ambiental (VMA) esta dado por las condiciones agrológicas o la capacidad agrícola determinada por métodos comparativos (dado en términos del valor del techo y del piso ambiental)

5.14 Estimación del riesgo

El riesgo se define como las pérdidas materiales (riesgo económico) o pérdidas humanas (riesgo social) esperadas en cada escenario.

En el caso del riesgo económico las pérdidas se obtuvieron a partir de hacer el producto en un SIG del mapa de amenaza por el de vulnerabilidad por el de costo de los predios afectados, para cada uno de los parámetros hidráulicos considerados.

Por su parte el riesgo social se estimó multiplicado el mapa de amenaza por el de población en cada predio, con esto se obtiene el número de personas potencialmente afectadas al año por los flujos e inundaciones. Para cada parámetro hidráulico se definió una vulnerabilidad física de las personas se combina con la vulnerabilidad social para obtener un valor combinado de vulnerabilidad.

El número de personas potencialmente afectada por el valor de la vulnerabilidad combinada da el número potencial de vidas en riesgo al año en cada escenario.

CAPITULO 6

INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA CUENCA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL

En el presente capítulo se presentan los insumos básicos recopilados para la realización de las diferentes actividades requeridas para evaluar el riesgo en la parte alta de la cuenca del Río San Cristóbal. Para la obtención de estos resultados se adoptó el Marco Conceptual del Capítulo 4 y el Marco Metodológico del Capítulo 5.

6.1 TOPOGRAFIA

6.1.1 Topografía general

Como se expuso en el Capítulo 5, la topografía general de la zona de estudio fue una recopilación de diferentes fuentes, el producto final de esta actividad es presentado en el Plano Topografía general.

La topografía muestra que la cuenca de la Quebrada San Cristóbal se caracteriza por las altas pendientes desde las partes altas al cauce principal de la quebrada. La quebrada por su parte discurre sobre un depósito coluvial más o menos profundo, en donde muestra bancas no muy entalladas. En la parte baja de la cuenca la quebrada fluye encañonada entre un macizo rocoso en su margen derecha y un depósito coluvial en el margen izquierdo. Debido a esta diferencia en la resistencia de las bancas este sector muestra serios problemas de inestabilidad asociados con la socavación de la pata de las laderas.

6.1.2 Topografía particular

El objetivo de realizar la topografía particular fue el de detallar el perfil del cauce así como las diferentes secciones transversales, la información generada en esta actividad es presentada en el Anexo C -1.

En la parte superior del cauce las secciones son abiertas y muestran perfiles de banca de baja a media pendiente. En la medida que se desciende se observan secciones más cerradas y perfiles de banca de mayor pendiente. Esto se verá reflejado posteriormente en las condiciones de estabilidad de las bancas del

cauce, donde se observa que las secciones superiores son más estables que las inferiores.

6.2 Geología

El grupo de trabajo del componente geológico y geomorfológico estuvo constituido por los geólogos Julio Fierro Morales, Diego Vásquez y Ángela Prieto y por las auxiliares de geología Jennifer Ángel Amaya y Lorena Rayo. En la interpretación estructural se contó con la asesoría puntual del geólogo Mauricio Blanco y del auxiliar de geología Wilson Casallas. En la fase de oficina colaboraron además los auxiliares de geología Carolina Londoño y Jaime Corredor.

6.2.1 Revisión bibliográfica

Con el fin de tener un marco de referencia del trabajo llevado a cabo, se adelantó una revisión bibliográfica, la cual se menciona a continuación, de manera cronológica de trabajos más antiguos a más recientes.

- Clements, T. 1927. La Falla de Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.

Este documento postula, con base en criterios geológicos generales (inversión de estratos) y geomorfológicos la existencia de una falla a lo largo del pie de los Cerros Orientales de Bogotá.

- Parra, H. y Royo y Gómez, J. 1942. Informe sobre las explotaciones rocosas del Municipio de Bogotá. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.

En este documento por primera vez se puede observar la preocupación de estancias gubernamen

tales distritales y nacionales con respecto a la inestabilidad de laderas en Bogotá. Allí se tiene información sobre inestabilidad de canteras en la zona del abanico del San Cristóbal: *“En las canteras de piedra hay que distinguir las que explotan... eluviones o formación de ladera... producen daños en las quebradas, caminos y derrumbes. Así tenemos las canteras... sobre el río San Cristóbal... Los derrumbes y deslizamientos en las canteras emplazadas en la ribera izquierda del río San Cristóbal, frente a la fábrica de municiones, han obstruido el camino del Acueducto y están cortando el de herradura el Delirio y Ubaque.”*

- Julivert, M. 1963. Estratigrafía y sedimentología de la parte inferior de la Formación Guaduas al sur de la Sabana de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 12. Bucaramanga, Colombia.

Este trabajo constituye la base de la caracterización de la Fm. Guaduas y sus descripciones sirvieron para la diferenciación de esta unidad en la fase de campo.

- Julivert, M. 1963. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 13 y 14. Bucaramanga, Colombia.

Este trabajo constituye la base de la caracterización de las formaciones Cacho y Bogotá y sus descripciones sirvieron para la diferenciación de esta unidad en la fase de campo.

- Pérez, G y A. Salazar, 1973. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Geología Colombiana No. 10. Bogotá.

Este trabajo constituye la base de la caracterización de las formaciones del Gr. Guadalupe y sus descripciones sirvieron para la diferenciación de unidades en la fase de campo.

- Ingeominas, 1988. Zonificación geotécnica del distrito especial de Bogotá.

A partir de la información sobre la tectónica de la Sabana de Bogotá, se modificó el marco tectónico para dicha zona.

- Villota, H. 1991. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Publicación IGAC. Bogotá.

En esta publicación se basa la metodología seguida para la propuesta de clasificación morfoestructural.

- Van der Hammen, T. 1995. Plioceno y Pleistoceno del Altiplano de Bogotá. Análisis Geográfico No. 24. Publicación IGAC. Bogotá.

Este trabajo define con un soporte técnico de alta calidad las formaciones post-orogénica andina y sobre sus definiciones se basó la existencia de la Formación Tilatá y la comparación con lo propuesto para la Fm. Tunjuelo.

- UPES – Ingeocim, 1998. Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafé de Bogotá. Bogotá.

Este documento contiene información litológica (descripción de materiales geológicos) en general de alta calidad. Sin embargo, la información de geología estructural es deficiente, con pocos datos de campo y poca sustentación sobre las fallas geológicas propuestas. La cartografía geológica incluye información sobre la parte más occidental del área de estudio, en escala 1:10.000.

- Vargas, G. 1999. Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa. Proyecto Río Guatiquía. Villavicencio.

Se tomaron definiciones morfológicas (provincias) que sirvieron en la propuesta de clasificación morfoestructural.

- Paris, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. 2000. Map and Database Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. Open-File report 00-0284. United States Geological Survey.

Es la compilación más completa sobre las fallas geológicas activas en Colombia. Para el caso de Bogotá, únicamente se menciona de manera preliminar el estado del arte del conocimiento de la Falla de Bogotá.

- DAMA – Fierro, J. 2004. Seguimiento y control del componente geotécnico de la industria extractiva en el Distrito Capital. Informe interno. Bogotá.

De este informe se tomaron datos estructurales de estratificaciones, diaclasas y fallas en algunas canteras de la localidad de San Cristóbal y se transcribieron apartes sobre las características geotécnicas generales de las unidades geológicas aflorantes.

- CAR, 2006. Plan de manejo de la Reserva forestal protectora. Bosque Oriental de Bogotá. Documento principal. Informe interno. Bogotá.

Este documento incluye una compilación completa de aspectos geológicos y geomorfológicos de la totalidad de los Cerros Orientales de Bogotá. Constituyó la guía principal para la búsqueda de documentos recientes relacionados con la tectónica de los cerros. Incluye cartografía geológica y geomorfológica en escala 1:50.000.

- Dimaté, C., Taboada, A., Rivera, L. y D. Giardini. Seismotectonics on the Central Region of the Colombian Eastern Cordillera. www.chile.ird.fr/pdf/isagPDF/dimate.pdf

Contiene aspectos regionales sobre dominios estructurales y enfatiza en la porción de la Cordillera Oriental entre el Páramo de Sumapaz y Tunja. Hizo parte de la información de contexto presentada en el aparte de Geología estructural (Tectónica).

Otros documentos revisados son:

- Stutzer, O. 1920. Acerca de algunos rastros de glaciación diluvial en la cordillera próxima a Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- Alvarado, B. 1944. Informe sobre algunas explotaciones de piedra en la ribera occidental del San Cristóbal. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- Royo y Gómez, J., 1941. Las explotaciones de materiales rocosos y el ornato y la seguridad de Bogotá. Servicio Geológico Nacional de Colombia. Publicado en la Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia (CEGOC) por Ingeominas. Bogotá.
- Ujueta, G. 1961. Geología del Noreste de Bogotá, Boletín del Servicio Geológico Nacional, vol IX. Bogotá.
- Julivert, M. 1962. Estudio sedimentológico de la parte alta de la Formación Guadalupe al Este de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander No. 10. Bucaramanga, Colombia.
- Da Porta, J. 1974. Léxico Estratigráfico Internacional – Terciario y Cuaternario.
- Vergara, H., Taboada, A., Romero, J., Castro, E. y Paris, G. 1996. Actividad neotectónica de las principales fuentes sismogénicas de la región central de Colombia. Memorias V Congreso Colombiano de Geología.
- UPES – Ingeocim, 1998. Estudios y diseños de estabilidad geotécnica, control de erosión y manejo de aguas para la estabilidad de taludes. Informe de diagnóstico Sitio El Rocío (Localidad de San Cristóbal). Bogotá.

- DPAE – Hidrogeología y geotecnia ambiental. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa, diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio San Cristóbal sur (Localidad de San Cristóbal)
- DPAE – Hidroconsulta, 2000. Estudio de zonificación de amenaza por inundación del río Fucha en las localidades de San Cristóbal, Kennedy y Fontibón y recomendaciones de medidas de mitigación.
- Loboguerrero A. 2005. La Falla de Bogotá. Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.
- Vargas, C. y T. Durán. 2005. State of strain and stress in northwestern of South America. Earth Science Research Journal Vol. 9 (1).

6.2.2 Marco geológico regional

El sector de la Cordillera Oriental que comprende la cuenca del Río San Cristóbal, hace parte de dos dominios geológicos principales, separados por diversas fallas geológicas: los Cerros Orientales y la Sabana de Bogotá. El área de estudio está conformada por una secuencia de rocas sedimentarias pre-eocénicas que van desde el Cretácico Superior (Formación Chipaque, Grupo Guadalupe) pasando por secuencias terciarias (Formación Guaduas, Formación Cacho y Formación Bogotá), hasta depósitos del Terciario tardío y del Cuaternario no litificados, posteriores al levantamiento de la Cordillera Oriental, tales como las formaciones Tilatá, Río Tunjuelo y Sabana.

La Sabana de Bogotá está conformada por extensos depósitos lacustres, aluviales y fluvio-glaciares del Plioceno tardío y del Cuaternario, que evidencian influencia de la configuración geomorfológica actual. Dentro de estos materiales se destacan los depósitos fluvio-torrenciales, con influencia glacial denominados Formación Tunjuelo, la cual corresponde con las formas de abanicos (como el de San Cristóbal).

También se presentan coberteras de suelos residuales producidos por la meteorización de las rocas preexistentes, coluviones como producto de procesos de ladera y suelos negros orgánicos que presentan una fuerte influencia del vulcanismo ocurrido durante los últimos 3 Ma, en el territorio colombiano.

Con respecto a la tectónica, se observa un sistema de fallamiento principal con dirección aproximada Norte – Sur, que define la dirección de la principal estructura geológica de la zona: el Anticlinal de Bogotá – Usaquén. Esta estructura está

limitada al oriente por el Sinclinal de Teusacá y al occidente por el Sinclinal de Usme; en su flanco oriental está afectado por la Falla de Bogotá. Adicional a los pliegues y fallas con dirección predominante Norte – Sur, se encuentra un sistema de fallamiento superpuesto, con dirección predominante N45E, conjugado con un sistema N45W con deformación principal de tipo dextral. Es probable explicar con un solo evento con σ_1 280/24 dos fases de deformación, una de ellas con cabalgamientos N-S y una que puede corresponder a alivios tectónicos y que define las fallas conjugadas con predominio de movimiento lateral.

La tabla en la cual se recopilan todos los datos estructurales es presentada en el Anexo C -2.

6.2.3 Litología

En este numeral se tiene como referencia información del Léxico Estratigráfico Internacional (Julivert, 1968 y Da Porta, 1974), del estudio sobre el Grupo Guadalupe de Pérez y Salazar (1973), del estudio de Van der Hammen (1995) para las unidades del Plioceno y del Pleistoceno y del estudio del DAMA sobre los aspectos geotécnicos de la actividad extractiva en el Distrito Capital (DAMA – Fierro, 2004). Los párrafos que definen las características físicas en el área de estudio corresponden a la información tomada en este estudio.

Formación Chipaque (Ksch)

Nombre: Propuesto por Hubach (1931) y redefinida por Renzoni (1962). Este término fue utilizado inicialmente como Conjunto Chipaque para designar la parte superior del Grupo Villeta. Posteriormente Renzoni (1962) engloba en la Formación Chipaque al Conjunto Chipaque y al Conjunto Inferior del Guadalupe propuestos inicialmente por Hubach.



Fotografía 6 -1. Aspecto general de las lutitas de la Fm. Chipaque

Edad: Con base en datos paleontológicos se considera que comprende parte del Cenomaniano, el Turoniano y parte del Coniaciano (100 a 85 millones de años).

Área tipo y límites: En el sentido de Renzoni (1962) la Formación Chipaque se apoya sobre la Arenisca de Une y limita en su parte superior con la Arenisca Dura del Grupo Guadalupe, también formado por areniscas.

- *Características físicas en el área tipo*

Formado predominantemente por lutitas pizarrosas, entre las que se encuentran bancos de caliza, arenisca y caliza arenosa, hacia su parte superior está formado por bancos intercalados de areniscas y un horizonte de carbón (llamado “El Cerezo”).

- *Características físicas en el área de estudio*

La Formación Chipaque cubre la mayor parte de la cuenca montañosa, aunque en su mayor parte se encuentra cubierta por depósitos glaciales, coluviales y aluviales.

Esta unidad es principalmente finogranular, se caracteriza por presentar rocas con alto grado de diagénesis y de colores oscuros debido a su gran contenido de materia orgánica.

Corresponde a una secuencia de lutitas grises oscuras a negras, con alto contenido de materia orgánica, muy fisibles, en ocasiones astillosas. Cuando las lutitas son de composición silíceas, presentan partición ortogonal y fractura concoidea. Dentro de las estructuras internas predomina la laminación ondulosa paralela y no paralela, aunque también se presenta laminación planoparalela, marcada por láminas milimétricas continuas de arenisca de grano fino de color gris claro; estas láminas tienen espesores de entre 1mm a 1cm. También es común la estructura lenticular, es decir, lentes milimétricos de arenisca en lodolita. En algunos niveles se presentan concentraciones de material de 3 a 4cm de diámetro que le confieren a la roca un aspecto nodular.

Se presentan intercalaciones delgadas de areniscas lodosas como juegos rítmicos de capas onduladas de 5 – 20cm de espesor. También intercalaciones de capas decimétricas, con espesores promedio de 15cm, de areniscas de grano fino, bien seleccionadas, moderadamente cementadas, con cemento silíceo, fosilíferas, con moldes internos y externos de conchas de bivalvos los cuales se encuentran dispuestos de manera aleatoria dentro de las capas.

Estas secuencias lutíticas pueden presentar espesores mayores a 3 m, en la parte superior de la unidad pueden alcanzar espesores de 8 m. Además en zonas de intensa deformación desarrollan localmente clivaje tectónico penetrativo y replegamientos.

Se presentan intercalaciones mayores de capas de areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino, color gris medio, de muy bien a moderadamente cementadas con cemento silíceo y ferruginoso. Pueden variar a areniscas lodosas, de grano fino a medio, con granos subredondeados, de bien a moderadamente seleccionado.

Las estructuras internas típicas corresponden a laminación ondulosa y estructuras internas inclinadas y en artesa, marcadas por láminas de lodolita con mayor contenido de materia orgánica, la estructura *flaser* también es común en estas rocas. Algunas capas presentan gradación, con granodecrecimiento al tope. Las capas presentan geometría de tabular.

Las areniscas exhiben grados de bioperturbación variables que oscilan de medio a alto, lo que genera ocasionalmente el daño de las estructuras internas. Son comunes los icnofósiles (*Thalassinoides* y *planolites*) en los límites de las capas. Algunos de estos niveles contienen altas cantidades de material fosfático (*pélets* y espinas de peces), este material de origen biogénico usualmente se encuentra ausente, debido a procesos de disolución que generan porosidad móldica secundaria. El espesor promedio de estas capas es de 40cm, aunque pueden variar de 5cm a 1m. Se pueden encontrar en secuencia con espesores mayores a 7.2m.

Cerca al Alto de las Mirlas, al Sur de la cuenca, fue observado un nivel de carbón de 20cm de espesor, el cual corresponde al nivel de carbón presente en la parte superior de la unidad, llamado el “Cerezo”.

Su contacto con la Formación Arenisca Dura es transicional, marcado por un mayor contenido arenoso dentro de la secuencia.

La rocas lutíticas desarrollan suelos residuales arcillo limosos de color gris a pardo claro, de permeabilidad media a baja, plasticidad alta y consistencia dura. Además la meteorización, produce alteración de la roca a óxidos de hierro y aluminio que le confiere coloraciones rojizas. Se encontraron yeso y sulfuros como minerales de alteración.

Distribución en el área de estudio: Conforman la parte central de la cuenca alta, desarrollando morfologías suaves y bajas. Los afloramientos de mejor calidad se ubican entre la zona de antenas en el Cerro de La Teta y la bajada hacia Ubaque al sur de Cruz Verde.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

A pesar del alto grado de diagénesis que presentan estas rocas, su composición, su fuerte fracturamiento y el desarrollo de suelos residuales espesos, generan un comportamiento de roca blanda o suelo residual arcilloso en las zonas donde afloran, con presencia de procesos tipo flujo de tierras y deslizamientos rotacionales y traslacionales generalmente de tamaños pequeños a medio.

Además el contacto con la Formación Arenisca Dura, cuando es normal (con la arenisca ubicada sobre las lutitas) define una característica hidrogeológica desfavorable en cuanto a la estabilidad, y presenta flujos de tierras sobre suelos residuales arcillosos.

Grupo Guadalupe (Ksg)



Fotografía 6 - 2. Grupo Guadalupe y sus formaciones: de izquierda a derecha: Arenisca Dura, Arenisca de Labor, Plaeners y Arenisca Tierna. La secuencia se encuentra invertida. Sector de La Viga.

Nombre: Propuesto por Hettner (1892) como Guadalupe-Schichten y redefinido por Hubach (1957), Renzoni (1968) y Pérez y Salazar (1973) quienes lo subdividieron en Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp), Labor (Ksgl) y Tierna (Ksgt). El nombre de esta unidad procede del Cerro de Guadalupe, que conforma la Sierra de Bogotá.

Edad: Campaniano - Maastrichtiano Superior.

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Guadalupe queda comprendida entre las lutitas de la Formación Chipaque en la base, y el miembro inferior arcilloso de la Formación Guaduas en la parte superior. La localidad tipo para la Formación Guadalupe se encuentra en los cerros orientales de Bogotá.

- *Características físicas de la roca en el área tipo:*
 - Arenisca Dura (Ksgd): Arenisca cuarzosa, blanca a amarillenta por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro.
 - Plaeners (Ksgp): Areniscas blancas a amarillentas cuando están alteradas, cuarzosas, de grano fino a muy fino intercaladas con limolitas silíceas y

arcillolitas fisibles de colores grises a amarillentos. Es típica la fractura en forma de “panelitas” de las limolitas silíceas.

- Labor y Tierna (Ksglt): Areniscas blancas a grises claras, de grano fino a grueso, con estratificación gruesa a muy gruesa. La parte superior del conjunto la conforman areniscas cuarzosas y feldespáticas, de grano medio a conglomerático, ligeramente duras a friables, con estratificación cruzada, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras.

Distribución en el área de estudio: Las rocas duras del Grupo Guadalupe debido a su alta competencia forman las cuchillas que bordean la cuenca montañosa. En general, desarrollan pendientes abruptas, constituyendo relieves estructurales.

La sección completa del Grupo Guadalupe se observa en sectores como el Alto de la Viga (secuencia invertida) y el Páramo de Cruz Verde en la parte oriental y entre el Cerro del Aguanoso y el Cerro de La Teta hacia la zona occidental, en lo que tradicionalmente se conoce como la Sierra de Bogotá.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Los macizos rocosos correspondientes al Grupo Guadalupe se caracterizan por su variabilidad. Se puede generalizar un comportamiento de macizo rocoso en los miembros Labor y Tierna y Dura, donde predominan areniscas de regular a buena cementación, con intensidad de fracturamiento variable. Sin embargo, los macizos rocosos explotados (bancos de areniscas) tienen delgadas intercalaciones de lodolitas grises, que han conformado los planos a lo largo de los cuales se han presentado deslizamientos planares de grandes magnitudes.

El índice de calidad de roca RQD (ver glosario) varía entre 8 y 60, que indican un alto grado de fracturamiento de la roca. La medición de las características geotécnicas de los materiales han dado como resultado ángulos de fricción interna entre 16 y 18° para las lodolitas (que gobiernan las condiciones de estabilidad del macizo), dependiendo de las condiciones de humedad a las que se encuentren (DPAE, 2002).

Los procesos típicos en las canteras de la zona de El Zuque corresponden a caídas de bloques de arenisca en los escarpes de contrapendiente. Por otra parte, los deslizamientos planares de macizo rocoso se limitan a pequeños cortes viales paralelos al rumbo y donde pueden aflorar intercalaciones arcillosas que al humedecerse pierden sus propiedades normales de resistencia. Parece muy probable que los procesos medianos y pequeños correspondientes principalmente a flujos sean detonados por presiones de poros en los contactos areniscas – lodolitas típicos de este grupo.

Formación Arenisca dura (Ksgd)



Fotografía 6 - 3. Afloramiento de areniscas de la Fm. Arenisca Dura en el río San Cristóbal, en inmediaciones de San Isidro. Nótese la resistencia de la roca ante la socavación.

Nombre: Propuesto por Hubach (1931) y redefinido por Hubach (1957), Renzoni (1962) y Pérez & Salazar (1973). El nombre de esta unidad procede del hecho de la buena cementación típica de esta unidad

Edad: Cretácico Tardío (Coniaciano – Santoniano al Campaniano: 89 a 83 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Pérez y Salazar (1973) la Formación Arenisca Dura queda comprendida entre las lutitas negras de la Formación Chipaque en la base y las lodolitas y liditas de la Formación Plaeners en el techo. La localidad tipo para la Formación Arenisca Dura se encuentra en los Cerros Orientales de Bogotá.

- *Características físicas en el área tipo*

Arenisca en bancos muy gruesos con intercalaciones de limolitas, lodolitas, liditas y arcillolitas de colores claros y en capas finas. En el área de Bogotá la Arenisca Dura se destaca por su expresión morfológica acentuada que forman la cima de

los cerros que bordean el sector oriental de la Sabana, lo cual responde al predominio de niveles gruesos y abundantes de areniscas compactas (Pérez y Salazar, 1973).

- *Características físicas en el área de estudio*

Las rocas de la Formación Arenisca Dura generan una expresión morfológica fuerte debido a la competencia de sus estratos, conformado relieves positivos con zonas topográficamente altas.

Consta principalmente de cuarzoareniscas de grano muy fino a fino, bien seleccionadas, de color gris oscuro a gris claro, muy bien cementadas, en capas gruesas con espesores que pueden alcanzar los 2m. La cementación se produce por sobrecrecimiento de los granos de cuarzo y les confiere su dureza característica. Pueden contener cantidades menores de minerales micáceos y exhibir grados de bioperturbación variables de medio a alto. Además gradan a areniscas de grano fino a muy fino, lodosas, moderadamente cementadas, de composición cuarzosa y alto contenido de fosfatos, los cuales aparecen reemplazados por minerales arcillosos de colores parduscos.

También presenta niveles de arenisca de grano fino a medio, de bien a moderadamente seleccionadas, con granos subredondeados a subangulares, matriz arcillosa con alto contenido de micas, armazón grano-soportado, de colores gris oscuro a gris claro, pueden tornarse a tonos amarillentos y violáceos-parduscos por meteorización. Estos niveles muestran espesores decimétricos que oscilan entre 20 y 80cm aunque puede ser menor. Presentan porosidad y permeabilidad bajas.

Las estructuras sedimentarias típicas para las areniscas son la laminación ondulosa que varía a muy ondulosa, que puede ser no continua o paralela continua, marcada por láminas de espesor menor a 1mm de color gris oscuro con concentración de materia orgánica y menor tamaño de grano arena muy fina y limo, y estructuras internas como flaser de lodo. Aunque menos común presentan estratificación interna inclinada y en artesa. Las capas son en general ondulosas con geometrías tabulares. Se pueden presentar en secuencias de hasta 13m de espesor.

Entre las estructuras biogénicas comunes están los icnofósiles de tipo *thalasinoides* en los límites de las capas. Son abundantes los microfósiles (foraminíferos) y los moldes internos y externos de bivalvos que pueden presentarse articulados y en disposición caótica en las capas. Entre otras características se destaca la porosidad secundaria originada por la disolución de

fosfatos y micro y microfósiles produciendo oquedades. Contiene niveles nodulares de concentración de hierro.

Se intercalan con lutitas negras fisibles, con porcelanitas (liditas) y limolitas silíceas con partición ortogonal. Estas rocas presentan alto contenido micáceo que se concentra en los planos de fisibilidad. Como estructuras internas típicas se encuentran la laminación planoparalela y estructuras internas lenticular (lentes de material tamaño arena en lodo) marcada por niveles de arenisca de grano muy fino de color blanco-crema. Se preservan icnofósiles verticales en algunas capas. Los espesores varían de 80 cm para las intercalaciones de lodolitas, y pueden ser mayores a 2,5m para las limolitas. Las lodolitas pueden presentar esquistosidad tectónica, con desarrollo de clivaje paralelo a las superficies de las diaclasas y replegamientos en zonas intensamente cizalladas y aparece ocasionalmente yeso como mineral de alteración. En ocasiones pueden presentarse como intercalaciones rítmicas de areniscas lodosas de color gris con laminación ondulosa en capas de 10 a 30cm, con lodolitas grises claras con laminación planoparalela y fisilidad alta. Alcanzan espesores mayores a 4m. En general las intercalaciones lodosas generan suelos arcillosos rojizos de poco espesor.

En el contacto con la Formación Plaeners aparecen progresivamente secuencias de areniscas lodosas y lodolitas silíceas y el contacto con la Fm. Chipaque está marcado por el aumento en cantidad y espesor de intercalaciones de lutitas negras.



Fotografía 6 - 4. Detalle de areniscas de la Fm. Arenisca Dura. Nótese la estructura de laminación ondulosa producida por bioperturbación.

Distribución en el área de estudio: Conforman los contrafuertes montañosos de la cuenca montana al oriente (cerro de Cruz Verde y La Viga) y occidente (cerro del Zuque y Cerro El Aguanoso). Las mejores exposiciones de esta unidad se encuentran en la Cantera del Zuque y el Alto de La Viga.

▪ *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

En zonas de cortes viales presenta pequeños procesos de remoción en masa tales como caídas de bloques y deslizamientos planares (comportamiento típico de macizo rocoso). Hacia la base, esta unidad presenta condiciones hidrogeológicas desfavorables para la estabilidad con rocas permeables (areniscas) ubicadas sobre lodolitas, con presiones de poros que generan pequeños flujos de tierra someros.

Formación Plaeners (Ksgp)



Fotografía 6 - 5. Afloramiento de lodolitas y liditas de la Fm. Plaeners en la cantera El Zuque (secuencia invertida). En la parte superior del afloramiento existe un paquete de lodolita de cerca de 8 metros de espesor, característica ausente de todas las otras formaciones del Guadalupe.

Nombre: Propuesto por Lleras Codazzi (1928) y redefinido por Hubach (1951). El nombre de esta unidad procede del hecho de la partición típica en pequeños prismas regulares (Julivert, 1968).

Edad: Cretácico Tardío (Campaniano - Maastrichtiano inferior: 75 a 70 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Plaeners queda comprendida entre las areniscas cuarzosas de grano fino de la Formación Arenisca Dura en la base y las areniscas de grano fino a medio de la Formación Arenisca de Labor en el techo. La localidad tipo para la Formación Plaeners se encuentra en los Cerros Orientales de Bogotá.

- *Características físicas en el área tipo*

Limolitas silíceas, liditas y arcillolitas silíceas interestratificadas, intercaladas con areniscas de grano muy fino en bancos de estratificación gruesa separados por finas capas de arcillas. La principal litología son las liditas, en banquitos separados por capas más finas de arcillolitas grises y claras; presentan fractura concoide y partición en prismas y varían lateralmente de muy puras a arcillosas (Modificado a partir de Pérez y Salazar, op. cit.)

- *Características físicas en el área de estudio*

Son secuencias de liditas verdosas eventualmente pardas, en capas tabulares delgadas de máximo 15cm de espesor, con laminación planoparalela y fractura concoidea. Presentan partición prismática típica, que le confiere el aspecto de “panelitas”, este rasgo caracteriza la unidad. Intercaladas con capas centimétricas (menores a 20cm) de limolitas silíceas, lodolitas arenosas de color gris claro, fisibles y areniscas lodosas de grano fino a medio.

Se encuentran separadas por capas gruesas con espesores de 3m de areniscas de grano fino y fino a medio, con matriz arcillosa, granos subredondeados y cementación muy buena a moderada, de carácter silíceo, con colores que varían de grises a habanos. Su composición es predominantemente cuarzosa aunque pueden contener cantidades importantes de fragmentos fosfáticos (10%). Forman capas con geometrías tabulares y laminación y estratificación planoparalela. Alcanzan espesores de 2,5m.

Las estructuras biogénicas comunes corresponden a icnofósiles al tope y base de las capas de areniscas del tipo *Talassinoides*. Esta actividad biológica origina pérdida de la estructura interna de la roca, es decir, que algunos niveles arenáceos pueden tener grados de bioperturbación medios a altos. Las lodolitas y liditas contienen microfósiles, cuya disolución produce porosidad secundaria.

Las limolitas silíceas a nivel microscópico presentan una textura maciza sin variaciones importantes, compuesta principalmente por agregados de cuarzo, color gris crema.

El contacto con la Formación Arenisca de Labor está marcado por una secuencia de areniscas de grano fino a medio, con cementación moderada y areniscas lodosas muy ondulosas y una disminución drástica de las intercalaciones lodosas. (Ver Columna estratigráfica)



Fotografía 6 - 6. Detalle de liditas de la Fm. Plaeners. Nótese la partición prismática típica y la afectación tectónica. Cantera El Zuque.

Distribución en el área de estudio: Aflora entre la zona montañosa que bordea la cuenca, Las exposiciones mejor preservadas y en la que se conserva la secuencia completa se encuentran en el Alto de La Viga y La Cantera El Zuque.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

En general presenta condiciones hidrogeológicas desfavorables para la estabilidad con rocas permeables (areniscas Labor y Tierna) ubicadas sobre las lodolitas, con presiones de poros que generan pequeños flujos de tierra someros.

Formación Arenisca de Labor (Ksgl)



Fotografía 6 - 7. Afloramiento de areniscas y lodolitas de la base de la Fm. Labor en la cantera El Zuque (secuencia invertida). Obsérvense los paquetes de areniscas con geometría plano paralela.

Nombre: Propuesto por Lleras Codazzi (1928) y redefinido por Hubach (1951). El nombre de esta unidad procede del hecho que han sido laboreadas tradicionalmente para obtener materiales de construcción (Julivert, 1968).

Edad: Cretácico Tardío (Maastrichtiano inferior: 70 a 68 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Guadalupe queda comprendida entre las lutitas de la Formación Chipaque en la base, y el miembro inferior arcilloso de la Formación Guaduas en la parte superior. La localidad tipo para la Formación Guadalupe se encuentra en los Cerros Orientales de Bogotá.

- *Características físicas en el área tipo*

Este aparte se basa en el trabajo de Pérez y Salazar (1978) que estudiaron de manera detallada el Grupo Guadalupe en los Cerros Orientales de Bogotá.

Encierra hacia la base areniscas arcillosas, grisáceas a blancas de grano muy fino a fino, bien seleccionadas. Yacen en bancos gruesos separados por capas finas de arcillolitas, frecuentes y de mayor espesor en la base. Muestran fracturamiento prismático, laminación y estratificación gradada.

En la parte superior se expone en intercalaciones de areniscas con horizontes de lodolitas dispuestas en paquetes con espesores similares. Las areniscas son arcillosas con granulometría variable de muy fina a fina, con porciones de grano grueso. Son comunes: la ocurrencia de ondulitas, la estratificación ondulosa, ondulosa lenticular y esporádicamente la laminación plano-paralela. Los icnofósiles son escasos.

El espesor de la Formación en Usaquéen es de aproximadamente 75 metros (según datos expuestos en el Léxico Estratigráfico Internacional, Julivert, 1968) y de 177 metros de acuerdo con las secciones levantadas por Pérez y Salazar (op. cit.) en los afloramientos ubicados en las quebradas El Higuierón y La Vieja.

- *Características físicas en el área de estudio*

Consiste en intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino a medio principalmente, aunque existen variaciones del tamaño de grano hasta llegar a areniscas de grano grueso, pueden ser de moderadamente a bien seleccionadas, con granos subredondeados a subangulares, cementación buena a moderada, pueden contener bajo contenido de matriz limo-arcillosa de color blanco compuesta principalmente por arcillas caoliníticas y granos de cuarzo. Presentan colores grises y blancos amarillentos cuando se encuentran meteorizadas. Poseen porosidad secundaria tanto por lavado de lodo como por disolución de microfósiles; el grado de porosidad y permeabilidad es moderado.

Composicionalmente son cuarzosas con contenidos importantes de micas (tamaños menores a 2mm) y fosfatos, los cuales corresponden a fragmentos de espinas de peces y pélets. Además contienen foraminíferos calcáreos en proporciones menores a 5%. Presenta icnofósiles a la base de las capas, aunque son poco comunes. El grado de bioperturbación que presentan estas rocas es medio.

Las estructuras sedimentarias típicas son la laminación ondulosa que varía a planoparalela y la estratificación interna inclinada y en artesa. Algunos niveles muestran gradación de tipo granodecreciente hacia el techo, tanto en tamaño macro como micro y estructura en *flaser* de lodo. También son comunes las marcas de oleaje en el tope de las capas. Presentan estructuras internas inclinadas a planoparalelas.

Forman capas con geometrías lenticulares (paleocanales) cuyos espesores son de aproximadamente 15cm y longitudes mayores a 3m y capas con geometrías tabulares ondulosas en los contactos de las capas, pueden alcanzar espesores de 1,5m aunque generalmente se encuentran en capas centimétricas (30cm de espesor promedio).

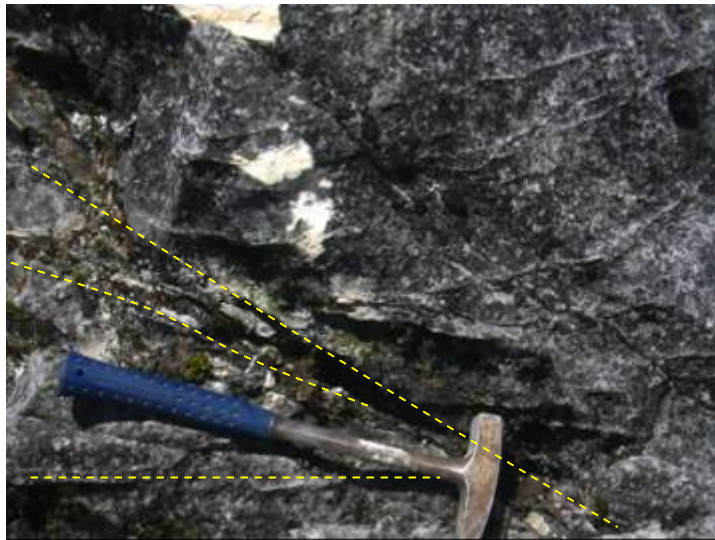
Poseen intercalaciones de capas de limolitas silíceas grises oscuras, con laminación planoparalela, marcada por láminas de 2 a 5mm de espesor de arenisca de grano muy fino y color crema blanco, las cuales pueden ser continuas o formar lentes. No desarrollan fisibilidad, y las capas muestran geometrías lenticulares a tabulares, cuyos espesores varían entre 1 a 15cm.

Distribución en el área de estudio: La Formación Labor conforma la parte más alta de la zona montañosa de la cuenca. Sus mejores exposiciones se aprecian en el Alto de La Viga y en el camino por la cuchilla occidental hacia el Páramo de Cruz Verde.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos.*

En zonas de cortes viales presenta pequeños procesos de remoción en masa tales como caídas de bloques y deslizamientos planares (comportamiento típico de macizo rocoso)

Formación Arenisca Tierna (Ksgt)



Fotografía 6 - 8. Areniscas de la Fm. Arenisca Tierna, meteorizadas. Se destacan aspectos de geometría interna (estratificación interna inclinada). Sector de La Viga.

Nombre: Propuesto por Lleras Codazzi (1928) y redefinido por Hubach (1951). El nombre de esta unidad procede del hecho que han sido laboreadas tradicionalmente para obtener materiales de construcción (Julivert, 1968).

Edad: Cretácico Tardío (Maastrichtiano medio a superior: 68 a 65 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Guadalupe queda comprendida entre las lutitas de la Formación Chipaque en la base, y el miembro inferior arcilloso de la Formación Guaduas en la parte superior. La localidad tipo para la Formación Guadalupe se encuentra en los cerros orientales de Bogotá.

- *Características físicas en el área tipo*

Este aparte se base en el trabajo de Pérez y Salazar (1978) que estudiaron de manera detallada el Grupo Guadalupe en los Cerros Orientales de Bogotá.

Está constituida hacia la base por una intercalación de bancos gruesos de areniscas con bancos menos gruesos de lodolitas finamente interestratificadas. Estas últimas desaparecen hacia el techo y se reducen a delgadas capas de arcillolitas. Las areniscas son arcillosas, esporádicamente sin matriz, de color pardo amarillento a blanco, de grano grueso a muy grueso, con porciones conglomeráticas frecuentes y porciones de grano medio a fino esporádicas. La selección es regular a mala. Es característica la alternancia de bancos de arenisca con estratificación inclinada en cuñas y estratificación ondulosa lenticular en el tope de la formación. Las lodolitas reposan como interlaminaciones paralelas ondulosas o lenticulares de limo o arena muy fina o arcilla. Los icnofósiles entallan principalmente los planos de estratificación y las capas de arcillolitas que separan los bancos de arenisca.

El espesor de la Formación en Usaquéen es de 50 a 100 metros (datos expuestos en el Léxico Estratigráfico Internacional, Julivert, 1968) y de 40 metros acorde con las secciones levantadas por Pérez y Salazar (op. cit.) en los afloramientos ubicados de la carretera a Choachí.

- *Características físicas en el área de estudio*

Está definida por areniscas blancas a grises claras (que alteran a colores amarillentos), con matriz arcillosa (en porcentaje menor al 10 %), de composición cuarzosa y en algunos niveles levemente feldespáticas (con estos minerales alterados a arcillas blancas) de grano medio a grueso (incluso conglomerático), con estratificación gruesa a muy gruesa con presencia de estratificación interna inclinada e icnofósiles en las capas de techo. La cementación es variable, de friables a moderadamente cementadas. Las intercalaciones corresponden a capas de menos de 50 cm de lodolitas (arcillolitas limosas) de colores grises claros, generalmente dispuestas en capas delgadas con estratificación ondulosa paralela

y laminación plano paralela. Las secuencias de areniscas contienen capas de 3m de espesor en promedio y pueden llegar hasta 7m.

Presenta intercalaciones de areniscas bien cementadas en láminas de espesores promedio de algunos milímetros hasta 3 centímetros, con lodolitas grises y niveles ferruginosos, en secuencias con espesores mayores a 60 cm con laminación planar de espesor variable entre 5 y 10 cm en secuencias con espesores aproximados de 3m.

Distribución en el área de estudio: Los mejores afloramientos se tienen en el extremo oriental del área de trabajo, en el sector de La Viga – El Verjón alto.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Esta unidad presenta evidencias de caída de bloques probablemente por procesos de gelifracción en épocas más frías en la actual zona de páramo.

Formación Guaduas



Fotografía 6 - 9. Afloramiento de areniscas de la Fm. Guaduas (probablemente el nivel "La Guía") en una cantera cercana al Barrio Aguasclaras (secuencia normal). Obsérvense los paquetes de areniscas con geometría plano-paralela a lenticular.

Nombre: Propuesto por Hettner (1892) como Guaduas-Schichten y redefinido por Hubach (1957) como Formación Guaduas. El nombre de esta unidad procede de la población de Guaduas (Cundinamarca) situada en el borde occidental de la Cordillera Oriental sobre la carretera Bogotá-Honda.

Edad: Maastrichtiano Superior a Paleoceno Inferior (65 a 60 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Guaduas queda comprendida entre la Arenisca Tierna del Guadalupe superior, en la base, y la Arenisca del Cacho en la parte superior. Esta Arenisca del Cacho, para la mayor parte de autores representa la base de la Formación Bogotá. Según se deduce del trabajo de Hubach, la localidad tipo para la Formación Guaduas en la Sabana de Bogotá estaría en Guatavita: "La mejor exposición del Guaduas de la Sabana se halla en Guatavita entre la Arenisca Tierna del Guadalupe que forma el domo del Montecillo y el filo prominente al Sur constituido de la Arenisca del Cacho". No obstante Van der Hammen (1957) da como localidad típica para la misma Formación Guaduas la sucesión que se encuentra entre el Boquerón de Lenguaque y el Boquerón de Guachetá en el Departamento de Cundinamarca.

- *Características físicas de la roca en el área tipo:*

Conjunto Inferior. – Consta esencialmente de arcillas gris oscuras con algunos fósiles en la base.

Conjunto Medio. – Está determinado por dos niveles de areniscas. En la base la Arenisca Guía y en la parte superior la Arenisca Lajosa. Entre ambas areniscas se encuentra una masa de arcillas gris-oscuras, compactas, a veces carbonáceas y que contienen mantos de carbón explotables. Constituye en general la parte productiva de la Formación Guaduas.

Conjunto Superior. – Consta de "gredas rojizas, azulosas, verdosas y moradas entre las que localmente hay mantos inexplotables de carbón y bancos de areniscas no estables de grano más o menos grueso".

- *Características físicas de la roca en el área de estudio:*



Fotografía 6 - 10. Estratificación interna inclinada en areniscas de la Fm. Guaduas

Se manifiesta en su base como secuencias transicionales de lodolitas grises intercaladas con areniscas de grano fino a medio en capas de espesores entre 1,5 y 3 m.

Las areniscas con de tamaños de grano variables entre muy fino y medio, con buena cementación generada por procesos diagenéticos que causan sobrecrecimiento de los granos de cuarzo, bien seleccionados, de color gris claro a blanco. Son predominantemente cuarzosas y contienen micas (aprox. 2%) y remanentes de feldspatos, los cuales están generalmente alterados a arcillas.

También se presentan areniscas de grano grueso a medio y de grueso a guijoso, con granos subredondeados, mal seleccionados, y cementación que varía de mala a moderada, generalmente friables, de color gris claro. Este tipo de rocas son las más permeables de la secuencia.

Las areniscas pueden presentar altas concentraciones de foraminíferos y fosfatos (pélets) (alrededor del 10%), eventualmente se distinguen *Talassinoides* a la base de las capas. La bioperturbación de las rocas puede ser tan alta que no se distinguen estructuras internas y sean clasificadas como capas macizas. De lo contrario, se diferencian estructuras sedimentarias tanto internas como externas

señaladas por láminas muy delgadas con mayor contenido de materia orgánica o niveles con concentración de óxidos de hierro. Entre las internas se encuentran usualmente la laminación ondulosa paralela a no continua, la estratificación en artesa e interna inclinada, y el desarrollo de flaser de lodo. La estratificación interna inclinada se presenta en sets de 20 a 40cm con ángulos de inclinación de 20 a 25°. La estructura externa típica corresponde a marcas de oleaje al tope de las capas. La geometría de las capas varía entre lenticular (paleocanales) y onduladas. Se produce porosidad secundaria ocasionada por lavado de lodo y disolución de fósiles, formando oquedades que pueden tener arreglos paralelos con respecto a la estratificación.

Las capas de limolitas silíceas negras, lodolitas carbonosas y arcillolitas limosas violáceas pueden presentarse como interlaminaciones (1 a 2cm de espesor) o como secuencias de máximo 80cm de espesor. Desarrollan estratificación interna planoparalela, y convoluta, su fisibilidad es pobre a nula, pueden tener niveles concrecionales de 10 a 20cm de espesor. En zona de intensa deformación muestran plegamientos mesoscópicos. El contenido de materia orgánica aumenta tanto en algunos niveles que logran clasificarse como carbones. Presentan concentraciones de minerales micáceos en los planos de estratificación.



Fotografía 6 - 11. Detalle de lodolitas carbonosas intercaladas con láminas de arenisca (estructura flaser) de la Fm. Guaduas. Sector del Tanque del acueducto.

Distribución en el área de estudio: Aflora sobre las riveras del Río San Cristóbal en el sector del barrio Laureles, aproximadamente 200 mts aguas abajo de los

tanques de la Empresa de Acueducto. Sus areniscas han sido usadas como materiales para recebos, en zonas de extracción no recuperadas morfológicamente con problemas de estabilidad (caídas de bloques, deslizamientos y flujos de detritos asociados)

▪ *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Los macizos rocosos correspondientes a la Formación Guaduas se caracterizan por su variabilidad. Se puede generalizar un comportamiento de macizo rocoso en el Conjunto Medio, donde predominan areniscas de regular a buena cementación, con intensidad de fracturamiento variable. En los estudios llevados a cabo por Ingeominas (2003) en la zona de la antigua cantera Santa Rita se tiene que para las areniscas la resistencia a la compresión simple aplicada la carga paralela a la estratificación varía aproximadamente entre 150 y 1500 Kg/cm² y aplicada la carga perpendicular a la estratificación varía entre 160 y 2000 Kg/cm².

Los procesos típicos en las antiguas canteras de la zona de Perdomo Alto (Ciudad Bolívar) son caída de bloques de arenisca en los escarpes de contrapendiente y los grandes deslizamientos planares de macizo rocoso en zonas donde la actividad extractiva quitó el soporte basal a flancos monoclinales con cortes aproximadamente paralelos al rumbo de las estructuras (casos Cantera Santa Rita, en el sector de La Estancia - La Carbonera, en Ciudad Bolívar).

Los conjuntos inferior y superior presentan comportamiento de roca blanda o suelo residual arcilloso en las zonas donde afloran, con presencia de procesos tipo flujo de tierras y deslizamientos rotacionales y traslacionales generalmente de tamaños pequeños (menos de 500 m²).

Debido a que las arcillolitas se encuentran fuertemente alteradas por fallamiento local, pueden catalogarse como rocas blandas. Los estudios de Ingeominas (2003) han encontrado que la humedad natural se encuentra muy cercana al límite plástico, lo que permite inferir que el material rocoso puede entrar en el rango de comportamiento plástico frente a cambios en los estados de esfuerzos. En general los resultados muestran ángulos de fricción interna entre 18° y 39° con cohesiones cercanas a cero.

Formación Cacho



Fotografía 6 - 12. Aspecto de las areniscas de la Fm. Cacho (secuencia normal). Notese la geometría lenticular de las capas. Sector de San Jerónimo del Yuste.

Nombre: Propuesto por Scheibe (1918) como Arenisca del Cacho. El nombre de esta unidad procede del Pico del Cacho, ubicado al SW de Zipaquirá (Cundinamarca)

Edad: Paleoceno medio a superior (60 a 55 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Cacho queda comprendida entre las arcillolitas del miembro superior de la Formación Guaduas, en la base, y las arcillolitas de la Formación Bogotá en la parte superior. El mismo autor estudió esta formación en la zona sur de la Sabana en donde da como afloramiento típico la Quebrada de San Cristóbal.

Características físicas de la roca en el área tipo: Arenisca de color pardo a blanco, de alrededor de 100 m de espesor, con tamaño de grano que va desde fino a grueso, más grueso en la base, con estratificación cruzada, con intercalaciones de lutitas amarillentas a blancuzcas. Esta arenisca destaca en el relieve formando crestones.

- *Características físicas de la roca en el área de estudio:*



Fotografía 6 - 13. Ondulitas en el tope de una capa de areniscas de la Fm. Cacho (secuencia normal). Sector de San Jerónimo del Yuste.

Corresponde a areniscas de grano fino, colores grises oscuros en muestras frescas y amarillos fuertes en rocas alteradas, bien cementadas con óxidos de hierro producto de alteración química, los granos son subangulares a subredondeados presentando mala selección. Intercaladas con limolitas violáceas verdosas que gradan a areniscas lodosas de grano muy fino.

Son comunes las capas de arenisca de grano medio, líticas, de colores verdosos, con granos angulares, mal seleccionados y matriz limo-arenosa, su permeabilidad media.

Composicionalmente las areniscas están constituidas principalmente por cuarzo (variedad ahumada, hialina y rosada), fragmentos líticos de chert negro y micas. Las capas son lenticulares (con paleocanales de 6,5 m de amplitud) y presentan espesor que varían entre 20 y 80 cm. Presentan estructuras como laminación interna ondulosa y en artesa, además de marcas de corriente en la parte superior de la capas. Estas rocas muestran una permeabilidad baja, desarrolladas por lavado de lodo.

Se presentan intercalaciones de arcillolitas arenosas de color gris claro y areniscas de grano fino con espesor de 9m. Las unidades arcillosas pueden presentar fisilidad incipiente a nula.



Fotografía 6 - 14. Estratificación interna inclinada y ondulosa en areniscas de la Fm. Cacho (secuencia normal). Sector de San Jerónimo del Yuste.

Distribución en el área de estudio: Aflora a manera de crestones (lomerío estructural) al occidente del sector de Aguas Claras y constituye la zona de separación entre este barrio y San Jerónimo del Yuste.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Se presentaron procesos principalmente caída de bloques en zonas sujetas a extracción minera (sector de El Yuste). El comportamiento del material es el de un macizo rocoso con inestabilidad por intersección de discontinuidades.

Formación Bogotá



Fotografía 6 - 15. Aspecto de la Fm. Bogotá en una antigua zona de extracción cercana al Camino a Oriente. Existe un predominio de lodolitas no fisibles de colores rojizos intercaladas con capas de areniscas de espesor menor de 2 m.

Nombre: Propuesto por Hubach (1933). El nombre de esta unidad procede de la ciudad de Bogotá.

Edad: Paleoceno superior - Eoceno medio (55 a 50 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: La formación queda comprendida entre las areniscas de la Formación Cacho en la parte inferior y las de la Formación Regadera en la parte superior. Julivert le asigna como sección tipo el flanco oeste del sinclinal de Usme (Valle del Tunjuelo) a lo largo de la Quebrada Zo Grande y del filo al norte de esta quebrada.

- *Características físicas de la roca en el área tipo*

Conjunto de arcillolitas abigarradas, predominantemente rojas, con intercalaciones de arenitas de unos metros de espesor pero con gran predominio de las arcillolitas.

- *Características físicas de la roca en el área de estudio:*



Fotografía 6 - 16. Lodolitas de la Fm. Bogotá en una antigua zona de extracción no recuperada, afectada por procesos de erosión hídrica superficial concentrada.

Está conformada por arcillolitas con variaciones locales a limolitas y arenitas lodosas de grano fino. Intercaladas con capas de arenisca líticas de grano fino a medio, de color pardo amarillo a pardo verdoso.

Las arcillolitas son multicolores, con tonos variados de gris, blanco, rojo, pardo amarillo, con textura moteada, no físilas.

Las areniscas tienen alto contenido en líticos, son de color blanco a pardo-amarillo, con estratificación plano paralela continua y discontinua y plana no paralela continua, también es típica la estratificación interna inclinada. Son de grano fino a medio, esporádicamente grueso, competentes, con cementación moderada, en capas de menos de 3 metros de espesor.

Estas litologías se formaron a partir de sedimentos depositados en ambientes continentales de tipo fluvial.

Distribución en el área de estudio: La Formación Bogotá aflora hacia el occidente de la zona de estudio, en la cuenca del Ramajal al sur.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

La Formación Bogotá presenta comportamiento de roca blanda o suelo residual arcilloso, con presencia de deslizamientos rotacionales y traslacionales generalmente de tamaños pequeños (menos de 500 m²), flujos de tierra y reptación (movimientos lentos) que pueden aumentar su velocidad por cambios marcados de humedad (inducidos por causas naturales como precipitaciones por encima de lo normal o por causas antrópicas como desempate de tuberías de acueducto o alcantarillado). La morfología de la zona que contiene chircales y ladrilleras en la Localidad de San Cristóbal corresponde a una ladera monoclinal que buza con inclinaciones variables entre 20 y 30° hacia el occidente y que fue modificada por actividades extractivas.

Formación Tilatá

Nombre: Propuesto por Scheibe (1922). El nombre de esta unidad procede de la Hacienda Tilatá, en cercanías de Chocontá (Cundinamarca).

Edad: Pleistoceno (5 a 2 Ma antes del presente).

Área tipo y límites: Al parecer se encuentra interdigitada con los depósitos lacustres de la Formación Sabana.

- *Características físicas de la roca en el área tipo*

Arcillas, arenas y pequeños cantos de color blanco; morfológicamente los conos si no están muy degradados presentan una superficie fuertemente inclinada.

- *Características físicas de la roca en el área de estudio*

Arcillas, limos y arenas con un grado muy bajo de litificación. En la parte inferior afloran arcillas pastosas, no fisibles, de color gris verdoso en húmedo y gris muy claro en seco.

Distribución en el área de estudio: Estos materiales afloraban originalmente hacia el extremo occidental, bajo los actuales barrios circundantes al Velódromo.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos*

No existen procesos de remoción en masa, pero la susceptibilidad de los suelos ante la erosión puede detonar pequeños deslizamientos. Son extremadamente susceptibles a la erosión hídrica, tanto superficial como subsuperficial, la cual ha generado cárcavamiento (este ha sido reportado y representado en informes científicos desde el siglo XIX). La susceptibilidad de estos suelos a los procesos de erosión se debe a la composición química de las arcillolitas, especialmente por su alto contenido en caolinita.

Formación Río Tunjuelo



Fotografía 6 - 17. Aspecto de los materiales que conforman la Formación Tunjuelo

Nombre: Propuesto por Julivert (1961) como Conos del Tunjuelo y redefinido por Helmens (1990). El nombre de esta unidad procede del río Tunjuelo, ubicado al sur de Bogotá. De acuerdo con Helmens (en Van der Hammen, 1995) la formación se dividió en el miembro Subachoque (inferior) y el Sabana (superior); este último constituiría el Abanico del San Cristóbal.

Edad: Pleistoceno medio y tardío (1 a 0,2 millones de años)

Área tipo y límites: Suprayace arcillolitas de la Formación Usme. Su sección tipo es la parte suroriental de la Sabana de Bogotá, a la salida del río Tunjuelo a la Sabana.

- *Características físicas de la unidad en el área tipo:*

Se trata en realidad de fragmentos de varios conos que descendían de la vertiente Este del Valle del Tunjuelo y se fusionaban en el valle para formar un fondo aluvial. Estos conos están formados por un depósito uniforme de grandes bloques redondeados, algunos de los cuales pueden alcanzar hasta 1 m de diámetro. Se presentan algunas intercalaciones arcillo-limosas con una capa turbosa. El material pétreo procede íntegramente de las areniscas de la Formación Guadalupe. El espesor que presenta esta unidad puede alcanzar 90 m. Las gravas fueron depositadas en el centro de un gran delta que se adentraba por varios kilómetros en el lago. Durante los periodos interglaciales, la depositación de las gravas fue interrumpida por acumulación de arcillas lacustres y sedimentos turbosos (que podrían ser considerados extensiones de la Fm. Sabana).

- *Características físicas de la roca en el área de estudio:*

Depósitos aluviales antiguos del río Fucha

De acuerdo con Van der Hammen (1995) en varias partes de la Sabana de Bogotá donde pequeños ríos o quebradas que bajan de los páramos (anteriores centros de glaciación) llegan a la parte más plana, se encuentran gravas fluviales depositadas en épocas frías y sin duda de origen fluvioglacial.

Durante el Pleistoceno Medio y Tardío, la depositación en la cuenca de Bogotá tuvo lugar en un lago central más profundo (ver Formación Sabana). En los valles marginales, el encajamiento de los ríos y la acumulación de gravas alternaron en el tiempo. Sin embargo, grandes cantidades de gravas continuaron acumulándose hacia la parte sureste de la cuenca (ríos Tunjuelo y San Cristóbal).

Esta formación está constituida por los materiales acarreados por acción del agua (en periodos interglaciales por retrogresión de las nieves o en glaciales no muy fríos, que fue probablemente la condición del último periodo glacial que terminó hace cerca de 10.000 años). Corresponde a materiales aluviales con tamaños variados y formas sub-redondeadas. Los aluviones actuales son de tamaños sensiblemente más pequeños que los aluviones antiguos, conformados por grandes bloques sub-redondeados. Es probable que dichos aluviones antiguos se hayan formado en condiciones de torrencialidad relacionados con deslaves por derretimiento de masas glaciales.

Se describen como depósitos aluvio-torrenciales no litificados, con bloques redondeados clasto-soportados, con matriz arenosa. Los fragmentos pétreos alcanzan diámetros de 1 metro, pero el tamaño promedio está entre 10 y 30 cm. La secuencia visible alcanza espesores de 4 metros aproximadamente, sin niveles

oxidados intermedios, lo que indica un aporte continuo de material en la formación del depósito. La composición de los fragmentos está dominada por areniscas bien cementadas, provenientes de las rocas cretácicas ubicadas en la parte cordillerana de la cuenca.

En cuanto al comportamiento geotécnico, los depósitos fluvio-torrenciales son en general, suelos de comportamiento granular, clasto-soportados, con grandes bloques de arenisca. De acuerdo con las observaciones de campo y al hecho de tener escarpes considerables (más de 10 metros) con inclinaciones mayores de 60°, se pueden definir preliminarmente como suelos poco o moderadamente sensibles a los cambios de humedad.

A continuación se describen estos materiales en algunos puntos de observación para diferentes cursos de agua:

Quebrada Paloblanco cerca al pluviógrafo

Depósito con espesor mayor de 3 metros, carácter clasto-soportado, con matriz predominantemente arenosa. En los fragmentos pétreos predominan areniscas bien cementadas. Se midieron los clastos de mayor tamaño con el fin de suministrar insumos para el cálculo de la energía que los transportó (las unidades son cm):

130x70x90	300x230x120	90x120x80	160x80x40	80x130x30	140x180x90
70x50x30	120x120x100	80x110x40	90x50x50	120x50x60	150x80x60
120x70x50	120x80x60				

Quebrada Paloblanco (1.002.118mE – 993.539mN)



Fotografía 6 - 18. Depósitos torrencial antiguo, con bloques redondeados de gran tamaño, cubiertos por un depósito torrencial más fino. Sector de Paloblanco.

En este punto el depósito torrencial tiene una longitud de 47 metros, ancho de 10 m y espesor mayor de 1,5 m. Está cubierto por 70 cm de suelos limosos con influencia de cenizas volcánicas, lo cual evidencia su antigüedad, y da indicios de que el material aluvial con grandes bloques puede corresponder con condiciones climáticas diferentes a las actuales.

El depósito contiene bloques sub-redondeados de areniscas y calizas fosilíferas, es clasto-soportado, con matriz areno-limosa poco plástica. En este punto de observación no se observa evidencia de actividad torrencial reciente. Los cantos más grandes se encuentran cubiertos por líquenes, algas y hongos.

También aquí se midieron los clastos de mayor tamaño con el fin de suministrar insumos para el cálculo de la energía que los transportó (las unidades son cm):

90x50x40	50x30x40	40x20x10	10x10x12	150x60x70	50x40x70
40x40x70	30x20x10	30x20x10	50x110x40	50x60x40	70x80x40
110x60x40	110x60x50	20x15x10	40x50x30		

Río San Cristóbal

300 metros aguas arriba del Tanque del acueducto se llevó a cabo la medición de los bloques con mayor tamaño. Aproximadamente el 90% corresponden a bloques de arenisca de grano fino a muy fino, bien cementadas (en metros):

1.0x1.0x0.8 1.3x0.7x0.8 3.0x2.2x1.1 1.6x2.5x2.3 2.0x1.0x1.8

Distribución en el área de estudio: Conforman las márgenes del río San Cristóbal luego de su salida a la zona de sabana.



Fotografía 6 - 19. Evidencias del material del depósito torrencial antiguo, con bloques redondeados de gran tamaño, retrabajados por el río San Cristóbal.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

El comportamiento geomecánico del material está dado por los contactos bloque - bloque. Dado su comportamiento predominantemente granular, son susceptibles a la erosión, que en la zona de estudio se expresa como socavación lateral del río sobre sus márgenes.

Formación Sabana

Nombre: Propuesto por Hubach (1957). El nombre de esta unidad procede de la Sabana de Bogotá (Cundinamarca).

Edad: Pleistoceno medio y tardío (1 millón de años a 20.000 años, edades basadas en huellas de fisión)

Área tipo y límites: Generalmente suprayace la Formación Subachoque. Su sección tipo es la parte central de la Sabana de Bogotá.

Facies de los suelos en el área tipo: Constituida principalmente por arcillas. Hacia los márgenes de la cuenca de Bogotá existe un incremento en las intercalaciones de arcilla orgánica, turba/lignita, arcillas arenosas y arenas arcillosas. En el centro de la cuenca representa aproximadamente los 320 metros superiores de los 586 de espesor total de relleno sedimentario. En la parte central de la Sabana de Bogotá, la Formación Sabana está constituida por arcillas y en la parte media se encuentran pequeñas intercalaciones de arenas. Los 2 metros superiores presentan un complejo de suelos constituidos por cenizas volcánicas. La secuencia observada en las perforaciones de la Ciudad Universitaria muestra una secuencia de arcillas y arenas arcillosas con intercalaciones de arenas, turba/lignita y algunas gravas. El cambio lateral de facies que se observa en las secciones tipo también es notorio en otras perforaciones, es decir que se observa un incremento en las arenas e intercalaciones locales de turba, corriente arriba a lo largo de los ríos Bogotá, Fucha y Tunjuelito.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Las dataciones con ^{14}C indican que el marcado descenso del nivel del agua que condujo a la desaparición del gran lago de la sabana tuvo lugar al final del periodo glacial. El nivel del lago descendió en las zonas marginales (como el área de estudio) hace aproximadamente 40.000 años y hace 28.000 años en la zona central de la cuenca. El descenso en el nivel del agua pudo haber tenido su origen en la erosión fuerte del punto de salida del agua de la Sabana.

Los niveles freáticos, sin embargo, se encuentran cerca de la superficie (1 a 2 metros), con pequeñas variaciones estacionales que marcan una zona con mayores capacidades portantes en la época seca (dado que la succión aumenta los esfuerzos efectivos, que son los que definen la resistencia de los suelos). La zona sometida permanentemente a la presencia de niveles freáticos es menos resistente; los parámetros de resistencia que gobiernan las arcillas, tales como el ángulo de fricción interna y la cohesión disminuyen en condiciones de saturación y por consiguiente los cortes de excavaciones y las capacidades portantes son menores.

Formación Río Chisacá



*Fotografía 6 - 20. Zona de bloques angulares a subangulares en el tope de un depósito glacial.
Sector del Páramo del Buitre.*

Nombre: Propuesto por Helmens (1990). El nombre de esta unidad procede de la población de la Laguna de Chisacá, en el Páramo de Sumapaz.

Edad: Pleistoceno Tardío (dataciones con ^{14}C). Según Helmens (1990, en Van der Hammen, 1995) en los alrededores de la Sabana distinguió 4 complejos de

morrenas, el complejo 4 entre 3250 y 3700 metros de altitud es anterior a 12.760 ± 160 y posterior a 12.990 ± 190 años antes del presente. Este Complejo 4 coincide en alturas con los depósitos glaciales de la zona de estudio, razón por la cual se pueden datar como Pleistoceno Tardío.

Área tipo y límites: Páramo de Sumapaz, en el río Chisacá, Páramo de Peña Negra, el Páramo de Guerrero y el Páramo de Cruz Verde (Van der Hammen, 1995).

▪ *Características físicas del material en el área de estudio:*

Hacia finales del siglo XIX, Hettner se refirió a depósitos originados por actividad de glaciares en la Cordillera Oriental, entre Bogotá y la Laguna de Chingaza. Para la zona de estudio, Stutzer (1920) mencionó evidencias glaciares, señalando bloques estriados por glaciación en el sector de La Viga y superficies de acumulación glacial a diversas alturas en el camino a Ubaque.

Constituyen los materiales acarreados por acción del hielo (condición existente en la cuenca en los periodos glaciales mas fríos). Corresponde a depósitos de tamaños variados, mal seleccionados, generalmente matriz-soportados en matriz limosa. Los tamaños de los fragmentos rocosos varían entre 5 metros y pocos centímetros. Está constituida por fragmentos de rocas angulares a subangulares, hasta grandes bloques de arenisca en matriz arenosa.

A continuación se citan características de estos materiales a partir de descripciones llevadas a cabo en algunos puntos del área de estudio.

Páramo de Cruz Verde (1003584,991696)

Material clasto soportado, de tipo glaciar, heterogéneo, principalmente de matriz limo arcillosa, color gris pardo en seco y pardo en húmedo. Permeabilidad media a alta. La columna estratigráfica del material expuesto es:

0-10 cm	Influencia orgánica, matriz limosa. Fragmentos <1 cm. Profundidad de penetración de raíces de 30 cm
10-20 cm	Fragmentos de arcillolita 2x2 cm, matriz soportado
20-30 cm	Clasto soportado, fragmentos <3 cm, de lutitas negras, areniscas de grano fino color amarillo
30-40 cm	Clasto soportado fragmentos <2 cm, angulosos

- 40-50 cm Material clasto soportado, con fragmentos 5 cm, de arenisca lodosa color gris, angulosos, y limolitas silíceas color gris oscuro
- 50-60 cm Matriz soportado, con fragmentos < 1 cm
- 60-70 cm Material matriz soportado con fragmentos < 5cm
- 70-80 cm Material clasto soportado con fragmentos < 40 cm
- 80-90 cm Material matriz soportado con fragmentos < 20 cm
- 90-100 cm Material clasto soportado con fragmentos < 3 cm

Adyacente a este perfil se observaron zonas con bloques métricos (110x170 x200 cm)

Páramo de Cruz Verde- Sector La Cruz



Fotografía 6 - 21. Detalle de materiales de diversos tamaños, generalmente clasto-soportados en un depósito glacial.

Depósito en general clasto-soportado, con fragmentos con predominio de areniscas. En general, humedad media, plasticidad baja, permeabilidad alta y consistencia media a baja.

Perfil de morrena, de techo a base:

0-30 cm	Cenizas, materia orgánica carbonizada, fragmentos de arenisca de < 3 cm, matriz soportados en una matriz limosa
30-60 cm	Material clasto soportado, con fragmentos de arenisca de < 3 cm en una matriz areno limosa color gris claro
60-90 cm	Material clasto soportado, con fragmentos de arenisca tabulares, con tamaños de 2-4 cm, hasta 10 cm muy angulares, de color amarillo, grano fino y medio predominantemente
90-120 cm	Material clasto soportado, con fragmentos muy angulares hasta de 15 cm, de arenisca de grano muy fino. Matriz arenosa de color amarillo y grano medio con limo
120-150 cm	Material clasto soportado, con fragmentos angulares entre 2-4 cm hasta 15x10 cm, de arenisca.
150-180 cm	Sectores matriz soportados, fragmentos de 17x15 y 15 x 10 cm, aumenta el tamaño de fragmentos
180-210 cm	Matriz soportado, con clastos de 20x10 y 10x8 cm
210-260 cm	Clastos de 40x40, 40x30 cm, disposición caótica, no se observa estructura.

Camino Real – Alto del Buitre



Fotografía 6 - 22. Detalle de material graviloso en el tope de un depósito glacial. Nótese el cubrimiento del material con una capa oscura con influencia de cenizas volcánicas. Sector del Páramo del Buitre.

El depósito glacial presenta fragmentos pétreos subredondeados, con superficies gravilosas hacia el techo. En general son materiales clasto soportado, con gravas finas a medias, fragmentos angulares con tamaños predominante de 0,7x0,7x0,7 cm, de composición predominante arenosa de grano fino a muy fino además de limolitas síliceas tabulares. En algunos sitios hay variaciones laterales de textura, donde el porcentaje de fragmentos es menor del 10%, es decir, matriz soportado

Grada a materiales limoarenosos (arena de grano muy fino), de colores oscuros hacia el tope y amarillos hacia la base, volumen de fragmentos de menos de 3 cm cercanos al 10%. Costra de color amarillo a rojizo de tamaño limo-arena de grano muy fino.

Los bloques de roca contenidos en los depósitos son de formas aplanadas, angulares a subangulares matriz-soportados o clasto-soportados distribuidos

aprox. a 5 m de separación entre sí. En las zonas con predominio de bloques se tomaron medidas de tamaños de los fragmentos rocosos, que aparentemente muestran una distribución de tamaños trimodal (en m):

1.7x1.1x0.6	1.6x1.2x0.4	1.6x0.9x0.6	0.7x0.8x0.4	0.3x0.3x0.2
1.3x1.2x0.7	0.9x1.3x0.4	1.0x0.6x0.3	1.2x0.6x0.5	1.4x0.7x0.5

Carretera Zuque – Ubaque

Depósito glacial con un espesor de 1,5m, con bloques que prevalecen a la parte superior y que descansan horizontalmente sobre suelos antiguos con tectonismo de carácter normal (Plioceno?) y sobre lutitas de la Formación Chipaque.

Corresponde a una secuencia de materiales matriz soportados con tendencia al granodecrecimiento hacia la base, sin estratificación ni imbricación. Corresponden a fragmentos angulares con tamaños que varían desde gravas hasta bloques, aunque el tamaño predominante está entre 1 y 5cm. Las gravas (>3cm) corresponde a lutitas negras, lodolitas arenosas y areniscas oscuras. Los bloques son de areniscas de grano fino a medio bien cementada. La matriz presenta un predominio limoso con contenido de arcilla y arena, permeabilidad media a baja, color gris claro en seco y gris oscuro en humedo, humedad baja, consistencia firme y plasticidad media a baja.

Tamaño de bloques medidos (en metros):

1,5x1,5x0,6	1,0x0,4x0,3	2,2x1,1x0,6	1,4x0,9x1,0	2,0x1,3x0,9
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Distribución en el área de estudio: Estos depósitos se encuentran en la parte más alta de la zona de estudio, en forma de crestas morrénicas laterales/frontales que generalmente descansan sobre substrato rocoso. Las crestas morrénicas se encuentran en altitudes entre 3600 y 3300 msnm, en las cabeceras de las quebradas Upata, Río Blanco y La Fotoga.

- *Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos:*

Son estables y no presentan procesos de remoción en masa asociados a ellas.

Materiales no formalizados como formaciones geológicas

- Suelos residuales

Los horizontes de alteración son representativos sobre horizontes lutíticos de la Formación Chipaque y sobre horizontes arcillosos de la Formación Bogotá. Son suelos arcillosos, de alta plasticidad y permeabilidad baja, susceptibles a la formación de flujos de tierra y flujos de lodo. Mitigando esta condición, se suelen encontrar cubiertos por suelos coluviales y por suelos negros limosos; sin embargo, en zonas de extracción de materiales los suelos residuales han quedado expuestos y es allí donde se presentan flujos de lodos y flujos de tierras (cuenca de Ramajal).

- *Suelos residuales arcillosos desarrollados por meteorización de lutitas de la Formación Chipaque*

Suelos residuales tipo IC (Deere & Patton), textura arcillosa, color gris claro a pardo claro, permeabilidad media a baja, plasticidad alta, consistencia blanda, humedad media, con espesores máximos de 1 m. Descansa sobre horizontes de roca muy alterada (IIA) correspondiente a lodolita de color gris claro, que conserva estratificación plano paralela. El espesor de roca muy alterada puede alcanzar 3 metros, con lo cual se tienen espesores totales muy afectados por meteorización de cerca de 4 metros.

- *Suelos residuales arcillosos desarrollados por meteorización de arcillolitas de la Formación Guaduas*

La descripción de estos materiales se basa en observaciones del grupo de trabajo y en información suministrada por el Ing. Germán Tapia, quien a la fecha de elaboración de este informe se hallaba elaborando el estudio de amenaza por remoción en masa del IED Aguasclaras.

Suelos residuales tipo IC (Deere & Patton), textura arcillosa, color pardo medio a pardo oscuro, permeabilidad baja, plasticidad baja, consistencia blanda, humedad alta, con espesores máximos de 4 m. Descansa sobre horizontes de roca muy alterada (IIA) correspondiente a arcillolitas de color pardo claro, que conserva remanentes de laminación. El espesor de roca muy alterada puede alcanzar 2 metros, con lo cual se tienen espesores totales muy afectados por meteorización de cerca de 6 metros.

Los ensayos de laboratorio (G. Tapia, com. pers.) han resultado en arcillas de baja plasticidad y alta humedad, razón por la cual pueden presentarse problemas de estabilidad tipo flujo o deslizamiento lento.

– *Suelos residuales arcillosos desarrollados por meteorización de arcillolitas de la Formación Bogotá*

Suelos residuales tipo IC (Deere & Patton), textura arcillosa, color pardo a rojizo, característicamente moteados con colores violáceos, permeabilidad baja, plasticidad alta, consistencia dura en seco y blanda en húmedo, humedad variable, con espesores máximos de 3 m. Descansa sobre horizontes de roca muy alterada (IIA) correspondiente a lodolita de colores abigarrados, con predominio de colores rojizos a vinotinto, sin estructuras sedimentarias heredadas. El espesor de roca muy alterada puede alcanzar 3 metros, con lo cual se tienen espesores totales muy afectados por meteorización de cerca de 6 metros.

▪ Depósitos de ladera o coluviales

Depósitos no cementados, de tamaños diversos, desde bloques hasta guijos. La granulometría de la matriz y la composición de la fracción rocosa dependen del tipo de roca o material afectado por los procesos denudativos.

Se presentan depósitos de ladera relacionados con zonas de deslizamientos (antiguos o activos), con fracción rocosa de tamaños variados. La matriz suele ser arcillosa, así como el comportamiento del coluvión. Por esta razón, se presentan formas lobuladas y flujos característicos de materiales de plasticidad media a alta.

Existen depósitos coluviales en zonas de quiebre de pendiente, relacionados con procesos gravitacionales y también probablemente con condiciones de transporte glacial. Por su génesis son inherentemente inestables.

▪ Depósitos coluviales sobre suelos residuales de la Fm. Chipaque

Los coluviones desarrollados a partir de Formación Chipaque son matriz-soportados en matriz arcillosa de alta plasticidad, consistencia blanda en húmedo, color café oscuro, con fragmentos de 80x115x25, 10x30x10, 130x110x60, 4x5x2 cm, compuestos por areniscas de grano muy fino, cuarzosas y bien cementadas. El espesor observado varía entre 50 cm y 1,0 m. En muchos puntos se observaron estos coluviones cubiertos con más de 30 cm de suelos negros, lo cual evidencia que los procesos morfodinámicos que produjeron estos materiales son antiguos, anteriores al Holoceno.

Los depósitos coluviales situados en el sector del pluviógrafo de El Delirio son similares a los descritos y son cartografiables dado su tamaño.

Quebrada Paloblanco (1002131mE – 994685mN)



Fotografía 6 - 23. Coluvión matriz-soportado, con presencia de bloques de arenisca de menos de 50 cm.

Depósito coluvial con más de 1,5 metros de espesor, cubierto por 40 cm de limos orgánicos con influencia volcánica, plasticidad alta, permeabilidad baja. El depósito es matriz-soportado, con fragmentos de areniscas muy alteradas, con 15 cm de espesor con colores negros por lixiviación de materiales húmicos. La armazón del depósito es matriz soportado, en matriz de arena media-gruesa con fragmentos de 7 cm (2-10 cm) de chert, arenisca de grano medio color blanco y cementada. Permeabilidad alta y plasticidad baja.

El hecho de tener cherts implica que este coluvión es el retrabajamiento de materiales fluvio-glaciales.

Quebrada Paloblanco (1002119mE – 993501mN) (aguas arriba de la anterior)

Coluvión matriz soportado, matriz areno-arcillosa tamaño arena fina, presenta alta permeabilidad, color pardo oscuro, con fragmentos subangulares de arenisca de grano fino con flasser de lodo. Tamaños predominantes de fragmentos rocosos trimodales: 30x40x15 cm, 15x10x8 cm, 8x4x3 cm.

- Depósitos coluviales sobre suelos residuales de areniscas de la Fm. Guaduas

Camino a los Tanques

Más de 2 m de espesor de un depósito coluvial matriz soportado , con fragmentos de 13x10, 10x10, 10x20, 2x5, 3x2, 40x50, y 6x6 cm, angulares a subredondeados de arenisca de grano fino bien cementadas y lodolitas grises ondulosas carbonosas. La matriz es arenoarcillosa, con permeabilidad alta, plasticidad baja y consistencia media.

Hacia el tope se observa un paleosuelo, pardo oscuro, limo-arenoso, con abundante materia orgánica suprayacido por al menos 20 cm de coluvión. Hacia el NW se observa una gradación de la matriz al paleosuelo, este material tiene mayor contenido de materia orgánica, influencia de cenizas volcánicas, contacto neto e irregular, basado en diferencias de color y textura, variando a armazón clasto soportada con presencia de bloques subredondeados de areniscas de tamaño variado.

- Depósitos coluviales sobre areniscas del Grupo Guadalupe

Adyacente a la casa de San Isidro, 10 metros hacia el oriente

Depósito matriz-soportado con fragmentos angulares de areniscas cuarzosas de grano muy fino y limolitas silíceas. Las limolitas no sobrepasan los 5 cm. Bloques < 1 m de areniscas, muy angulares, matriz de color rosado, limo-arenosa. Consistencia firme, color gris pardo en húmedo, plasticidad y permeabilidad media a alta, humedad baja. De acuerdo con su consistencia y color el coluvión debe ser antiguo. El espesor es mayor de 3 m.

Adyacente a la casa de San Isidro, 50 metros hacia el occidente

Depósito clasto-soportado con disposición caótica de bloques de areniscas (tamaño promedio entre 2-15 cm), angulares. En los tamaños <5 cm, predominan las lutitas silíceas y limolitas silíceas, matriz de color amarilla, limo-arcillosa, plasticidad baja, permeabilidad media a alta, consistencia media a firme y humedad baja. El espesor es mayor de 4 metros.

- Depósitos coluviales sobre suelos residuales de lodolitas de la Fm. Guaduas

Quebrada La Pichosa

Coluvión matriz-soportado en matriz de arena muy fina a fina, algo arcillosa con bloques de areniscas con formas angulares. El tamaño promedio de los

fragmentos pétreos es de 15 cm. y el bloque máximo observado es de 35x25x25cm. El espesor es mayor de 2 m.

Barrio Aguas Claras

Coluvión matriz – soportado en matriz arcillo-arenosa, con pocos bloques (< 10%) de areniscas cuarzosas. La matriz tiene plasticidad media, permeabilidad alta, humedad media a alta, consistencia media. El espesor es de al menos 2m.

- Depósitos aluviales recientes (Qa)

Corresponden al material transportado en la actualidad por los ríos y quebradas en la zona de estudio. Se llevaron a cabo observaciones en algunos puntos del lecho de los ríos San Cristóbal y Paloblanco.

Río Paloblanco (1.002.118mE – 993.539mN)

Materiales torrenciales recientes, con pendiente del cauce de aproximadamente 5° (alta pendiente). El ancho de la zona de playón es de aproximadamente 20 metros. Son suelos transportados color gris pardo medio, matriz soportado, con textura areno arcillosa con gravillas de 3 mm a 5 cm con predominio de fragmentos de lutitas, permeabilidad baja, plasticidad baja-media, consistencia media. En cuanto a los fragmentos pétreos, predominio de formas planares subredondeados, con imbricación. También arrastre de fragmentos de areniscas y calizas fosilíferas con tamaño de clastos medidos así: 7x3x2, 10x4x4, 10x6x8, 16x10x7, 19x9x8, 13x9x4, 10x6x7, 10x4x9, 15x17x10 cm.

El espesor observado de materiales subrecientes que conforman una terraza muy baja (1 metro con respecto al lecho). Los tamaños máximos medidos en estos son: 10x8x9cm, 10x8x8cm, 8x6x7cm.

Río San Cristóbal



Fotografía 6 - 24. Tamaño típico del material de arrastre del río San Cristóbal aguas arriba del tanque.

Para suministrar insumos para definir aspectos de energía de la corriente actual del río, se midieron algunos de los bloques con mayor tamaño (300 metros aguas arriba del Tanque del Acueducto). Se observó una tendencia bimodal.

Fragmentos mayores (medidas en cm):

40x25x25 35x15x25 40x15x25 15x20x10 15x12x12 18x10x12

Fragmentos menores (medidas en cm, no incluyen la matriz):

5x2x3 5x3x2 5x2x4 5x5x3
3x2x5 4x1x3 5x3x5 3x6x2

En la parte más occidental de la zona de estudio el cauce del Fucha ha sido modificado mediante la construcción de presas sucesivas, con el fin de controlar la torrencialidad de la corriente (al parecer enfatizada por la explotación de materiales a mediados del siglo XX).

- Suelo tectonizado de origen incierto



Fotografía 6 - 25. Suelo antiguo, tectonizado, de origen incierto. Nótese la falla normal que desplaza el horizonte más claro.

Este material se ubica en algunos puntos dispersos del carretable Zuque – Ubaque.

Suelo transportado, dispuesto en capas centimétricas de limo-arcillosas a gravas finas. Las capas de grano fino presentan laminación planoparalela en las capas finas marcada por nivelitos de limos y arenas de grano muy fino y color blanco, color gris claro en seco y gris oscuro en húmedo, con oquedades por acción biogénica (raíces). Hacia la base presenta niveles arenosos y de gravas de máximo 1cm de espesor. Los niveles gravillosos presentan imbricación que demuestran transporte subacuoso. Los guijos son subredondeados a subangulares, de consistencia firme.

Este suelo se encuentra levemente tectonizado, presentando microfallamiento, predomina el fallamiento normal, formando micro grabens con desplazamiento milimétrico. Además infrayace morrenas de finales del Pleistoceno, razón por la

cual se puede datar como anterior a ésta época. Sin embargo, los microfalloamientos normales son usuales en formaciones como Marichuela y Balsillas, los cuales son más antiguos que las morrenas Miocenos tardíos a Pleistocenos tempranos.

- Suelos orgánico-minerales



Fotografía 6 - 26. Suelos negros con influencia de cenizas volcánicas

Los suelos han sido formados en sucesivas capas de cenizas volcánicas o depósitos de pendiente dominados por cenizas (Van der Hammen, 1995). No existe volcanismo reciente en la Cordillera Oriental, razón por la cual las cenizas provienen de los volcanes de la Cordillera Central, en particular del complejo volcánico Ruiz – Tolima.

Cubren la totalidad de las secuencias rocosas y de suelos y su espesor es variable entre pocos centímetros y 2 metros. En general están compuestos por limos de plasticidad media a baja, permeabilidad media, aunque la mezcla con aportes de la roca que constituye su substrato puede hacer variar su granulometría y su plasticidad. Son de colores oscuros, desde pardo gris hasta negro. Pueden contener fragmentos de madera carbonizada.

- Rellenos antrópicos

Existen a lo largo de las zonas que han sido adecuadas para urbanización y no constituyen una unidad cartografiada en la escala de trabajo.

6.2.4 Tectónica

Objetivos

Definir los elementos que determinan la configuración y disposición estructural de las unidades de roca, a lo largo de la cuenca, con el fin de establecer la orientación en la que actúan los esfuerzos tectónicos allí y en la porción sur de los cerros orientales.

Establecer la influencia de los eventos tectónicos que han configurado el relieve de los cerros, en la porción de la cuenca, en procesos como la erosión hídrica concentrada, los movimientos en masa y aún la disposición de depósitos recientes, acaecidos en torrentes fluviales, glaciales y gravitatorios, indicando para ello la resistencia del material y la susceptibilidad a ser deformado y fracturado.

Marco tectónico de la Cordillera Oriental

La Cordillera Oriental se conformó mediante múltiples fases de deformación a lo largo de la historia geológica. La primera fase de orogenia registrada es de mediados del Cretácico (cerca de 100 millones de años) y continuó de manera lenta hasta mediados del Terciario. El pulso de levantamiento más fuerte fue desde finales del Mioceno hasta finales del Plioceno o inicios del Pleistoceno (cerca de 2 millones de años). Está conformada mediante un estilo estructural de cabalgamientos de escama gruesa (alcanza grandes profundidades), con vergencia este y oeste (estructura en flor).

Según Dimaté et al. , los Andes colombianos son una amplia zona de deformación continental que vincula tres dominios tectónicos: (1) el cratón suramericano en el oriente, (2) el Complejo Caribeño en el norte y (3) las placas de Cocos y Nazca. La convergencia relativa entre estas placas es absorbida principalmente por la subducción a lo largo de la cuenca colombo-ecuatorial, la fosa caribeña del norte y por la deformación a lo largo de zonas de fallas activas y principales paralelas a los piedemontes de las cordilleras Oriental, Central y Occidental.

A nivel regional la Cordillera Oriental muestra diferentes estilos estructurales: el Dominio Norte, ubicado entre Tunja y Bucaramanga, caracterizado por pliegues y fallas con acimut N-NE, consistentes con un acortamiento en dirección E-SE. El Dominio Sur, al sur del Páramo de Sumapaz correspondiente a la zona de estrechamiento de la Cordillera, caracterizado en su flanco oriental por fallas principales de alto ángulo orientadas hacia el NE, con componente transgresivo y el flanco occidental por fallas de cabalgamiento con vergencia oeste y pliegues anchos y elongados.

El Dominio Central (que incluye la zona de estudio), ubicado entre Tunja y el Páramo de Sumapaz, se caracteriza por pliegues apretados y fallas con dirección NS y NNE en el flanco occidental y por cabalgamientos escalonados en el flanco oriental; dichos cabalgamientos constituyen los bordes de la amplia meseta denominada Sabana de Bogotá.

Marco tectónico de la Sabana de Bogotá

Para el sector de la Sabana, se transcribe la información postulada por Ingeominas (1988): En la zona que hoy ocupa la Sabana de Bogotá, la cordillera muestra un engrosamiento notorio en el que se encuentran los altiplanos Cundi-Boyacenses y la presencia de sucesivos anticlinales y sinclinales, por lo general fallados con sus flancos invertidos. Todas las estructuras ofrecen una dirección NW-SE sensiblemente paralela al eje general de la Cordillera Oriental y además los pliegues presentan un cabeceo hacia el sur de la Sabana.

Esta distribución estructural permitió subdividir la Sabana en tres partes: a) un bloque localizado al norte de la Falla de Usaqué, b) un bloque localizado al sur de la falla de San Cristóbal y c) un bloque central hundido, situado entre las fallas de Usaqué y San Cristóbal.

- *Bloque al norte de la Falla de Usaqué.*

Está constituido principalmente por sinclinales amplios y anticlinales estrechos con vergencia o hundimiento, tanto al Este como al Oeste. Es notable la desaparición, bajo los sedimentos de la sabana, de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo, los cuales corresponden a estructuras anticlinales que ofrecen una abrupta terminación en el extremo sur, al parecer, contra la prolongación de la trayectoria de la Falla de Usaqué.

La Falla de Usaqué está cartografiada en los cerros orientales de la Sabana y hacia el noroccidente se ha definido por los alineamientos de la parte sur de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo, además del control y alineamiento del río Juan Amarillo. A partir del movimiento que muestran las rocas del Cretácico, se ha deducido un movimiento dextral de 1 km de longitud.

En este bloque las estructuras más importantes que se presentan corresponden al Sinclinal de La Pradera-Subachoque, el Sinclinal de Río Frío, el Sinclinal de

Sesquilé, la Falla de Usaqué y varias estructuras menores que limitan los flancos de los pliegues sinclinales, tanto al oriente como al occidente.

- *Bloque Central*

Limita con los bloques anteriores y presenta las mayores amplitudes y profundidades del relleno Cuaternario de la Sabana de Bogotá. En este bloque se deduce por registros geofísicos y de pozos profundos, la presencia de una serie de pliegues sinclinales y anticlinales, dentro de lo que hoy es la depresión de la sabana, los cuales igualmente están limitados por fallas de cabalgamiento de tipo inverso.

En este bloque central, sector más sur, se ubica la porción septentrional de la zona de estudio.

- *Bloque al sur de la Falla de San Cristóbal*

Se localiza al sur del Bloque central y tiene como límite la prolongación de las fallas de San Cristóbal-Facatativá. Las estructuras más importantes de este bloque son: el Sinclinal de Usme, la Falla de Bogotá, aparentemente desplazada por la Falla de San Cristóbal, y la Falla del río Tunjuelito.

A la falla del flanco oriental del Sinclinal de Usme se le ha llamado la Falla de Bogotá, es una falla de cabalgamiento, presenta vergencia hacia el occidente y su movimiento parece estar asociado a la formación del anticlinal invertido de Bogotá.

En este bloque sur, sector más norte se ubica la porción meridional de la zona de estudio.

Aspectos tectónicos locales

La zona de estudio o cuenca del río San Cristóbal o Fucha, hace parte del límite oriental de la Sabana de Bogotá, conformado por unas elevaciones abruptas (por encima de los 3000 msnm). Esta cuchilla, que va desde el cerro de El Zuque hasta el cerro de La Teta, alineada Norte Sur, hace parte del flanco occidental de una estructura antiformal regional denominada anticlinal de Bogotá, cuyo flanco oriental está representado en la cuchilla que va desde el cerro de La Viga hasta el páramo de Cruz Verde.

Constituye una de las columnas estratigráficas más completas de la secuencia del Cretácico superior y del Neógeno en la Cordillera Oriental. Involucra rocas desde

el cretácico medio (Fm. Chipaque) hasta el Terciario inferior (Fm. Bogotá). Estos materiales conforman un anticlinorio orientado de manera general en sentido Norte – Sur, con geometría alargada y poco cabeceo, el cual separa las cuencas de la Orinoquía y del Magdalena. Se encuentra delimitada por fallas inversas de bajo ángulo hacia el oriente y el occidente (Falla de Bogotá) resultantes del pulso de levantamiento principal de la Cordillera Oriental. Posteriormente existen otro evento de deformación más reciente, caracterizado por la conformación de zonas de transferencia o desgarre con predominio de desplazamiento lateral derecho, de carácter regional y en la que están involucradas las rocas cretáceas y cenozoicas. Es importante mencionar que las fallas asociadas al segundo evento de deformación conforman sistemas conjugados en general orientados N45E y N45W.

Las estructuras, a escala macro, meso y microscópica, que hacen parte de los Cerros Orientales de Bogotá, poseen rasgos comunes a lo largo de toda la cordillera, y por lo tanto son resultados coherentes en un proceso deformativo regional. Esta asunción permite plantear la hipótesis de que con la medición directa de los elementos estructurales a escala de afloramiento, se puede obtener el insumo adecuado para formular un sistema estructural representativo de toda el área geológica estudiada (principio de la invariabilidad por efectos de escala).

Los rasgos estructurales que son apreciables, tanto en la fotointerpretación como en la observación directa, son: asimetría en los pliegues, flancos oriental y occidental del anticlinal de Bogotá generalmente invertidos, dislocaciones, ganchos de flexión y fallas con vergencia occidental predominantemente e importantes componentes de rumbo.

El Anticlinal de Bogotá es una estructura desarrollada en rocas Cretácicas y Neógenas de las unidades denominadas Formación Chipaque, en el núcleo y Grupo Guadalupe, Formaciones Guaduas, Cacho, y Bogotá hacia sus flancos. Esta estructura presenta una serie de cambios de disposición, a lo largo de los flancos, que determinan las regiones estructurales que subdividimos en este trabajo y que se definen de manera general a continuación:

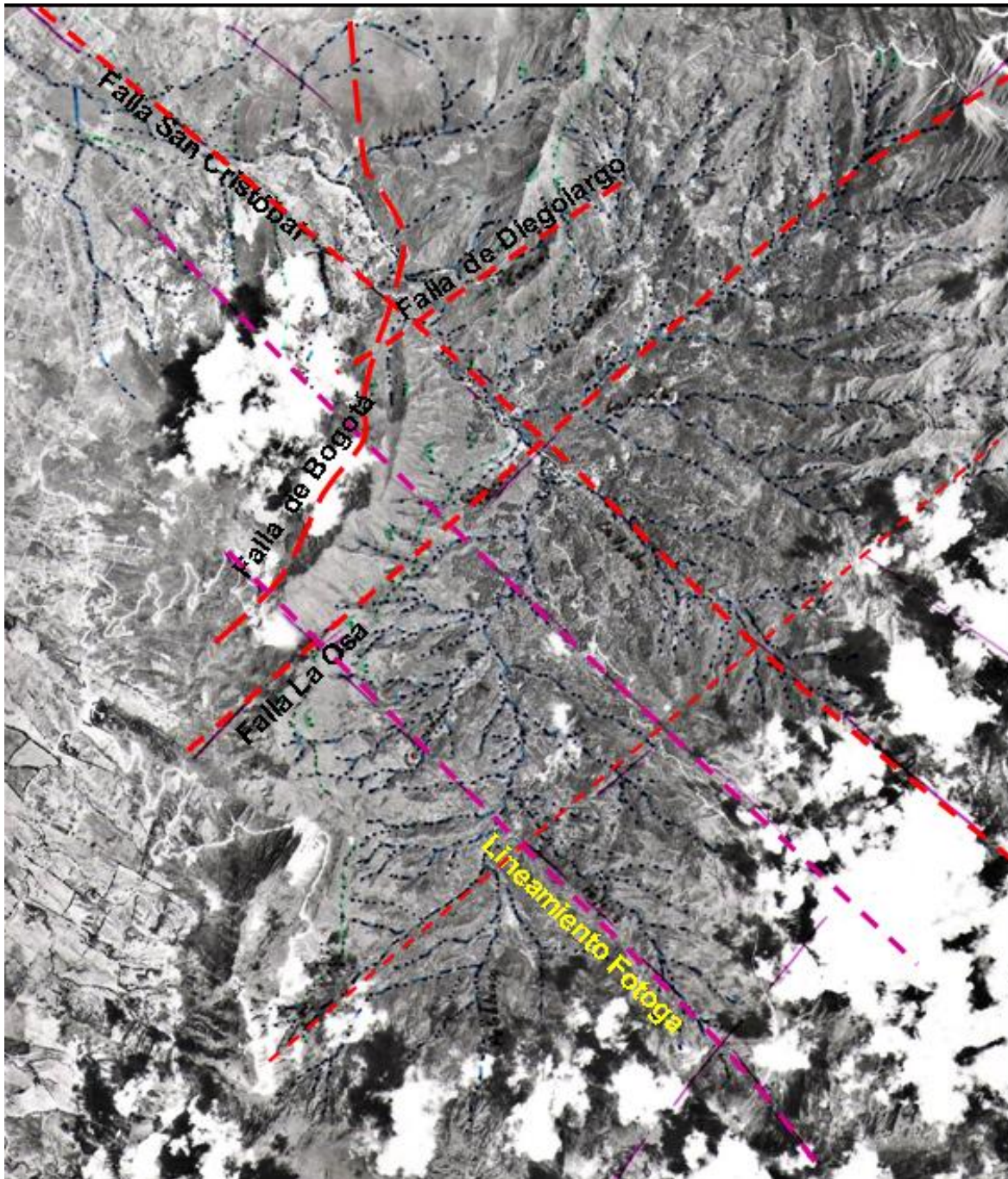


Figura 6-1. Lineamientos fotogeológicos que dividen las regiones estructurales.

Primera región estructural (Figura 6-1). Al sur de la quebrada La Fotoga, en el páramo de Cruz Verde, es un pliegue tumbado hacia la sabana, las areniscas del Grupo Guadalupe en su flanco este están en posición normal buzando suavemente hacia el oriente y el flanco occidental en inverso buzando 30° hacia el oriente.

Segunda región estructural (Figura 6-1), está delimitada por la Quebrada la Fotoga hacia el sur y la quebrada La Upata al norte, allí es un pliegue invertido en sus dos flancos, las areniscas del Grupo Guadalupe en el flanco oriental buzando 45° hacia el occidente y 35° en su flanco occidental hacia el oriente.

La tercera región estructural, (Figura 6-1), parece ser la más complicada estructuralmente, y comprende la franja más norte, desde la quebrada de La Upata, en esta franja el anticlinal tiene los flancos invertidos; en el oriental donde se encuentra el cerro de La Viga, las areniscas buzando de 45 a 60° hacia el oriente y donde se encuentra el cerro de El Aguanoso de 35 a 60° , mientras que en la sub cuenca de la quebrada de El Caracol, existe un contraste estructural dado por un buzamiento sub horizontal al norte y uno subvertical al sur y a lo largo del río San Cristóbal, y en el flanco oriental en la cuchilla que sube desde San Isidro hasta el cerro del Zuque, existen buzamientos subverticales en dirección occidental, respondiendo a la continuidad de la ladera del frente.

6.2.5 Estructuras



Fotografía 6 - 27. Aspectos geológicos geomorfológicos (ganchos de flexión) que permiten deducir fallamiento. Zona de San Isidro

A continuación se listan las estructuras geológicas más importantes del área. En el aparte de morfortectónica se describen los rasgos relacionados con la deformación producida por los esfuerzos tectónicos, mientras que en la tectónica cinemática se expresan soluciones teóricas a partir de la medición sistemática de rasgos tectónicos a nivel de afloramiento; es importante anotar que ninguno de los estudios revisados tiene datos estructurales que soporten el modelo tectónico propuesto para las fallas, lo cual pone de relieve el aporte del presente trabajo.

Fallas

- Falla de Bogotá

La Falla de Bogotá fue propuesta por Clements (1921) con base en criterios geomorfológicos y ha sido redefinida en estudios, entre otros, de Ujueta (1961), Ingeominas (1988), Vergara et. al. (1996), Paris et. al. (2000) y Lobo-guerrero (2006), entre otros.

Según Paris (op. cit.) esta estructura se extiende a lo largo de la base de los cerros que bordean la Sabana de Bogotá hacia el oriente y corta rocas sedimentarias del Cretácico y el Terciario y en alguna extensión depósitos

cuaternarios. La longitud de la falla es de aproximadamente 80 km y el sentido del movimiento es inverso con componente dextral.

Morfotectónica

Los rasgos morfológicos relacionados con la Falla de Bogotá son poco evidentes, en parte por el bajo ángulo de la estructura (las fallas verticales o sub-verticales, relacionadas con fallas de rumbo tienen una expresión rectilínea en la superficie). Sin embargo, el hecho de contactar rocas competentes con rocas poco competentes produce un contraste morfológico que en general define la falla.

Tectónica cinemática

La falla de Bogotá en el área del río San Cristóbal presenta un estilo estructural de cabalgamiento con inclinaciones entre 15 y 40°, con vergencia hacia el occidente. El flanco oriental presenta buzamientos de los planos de estratificación invertidos entre 15 y 40 grados, sugiriendo esto el ángulo de inclinación de la falla, el rumbo aproximado en la zona es de N15E (Figura 6-5).

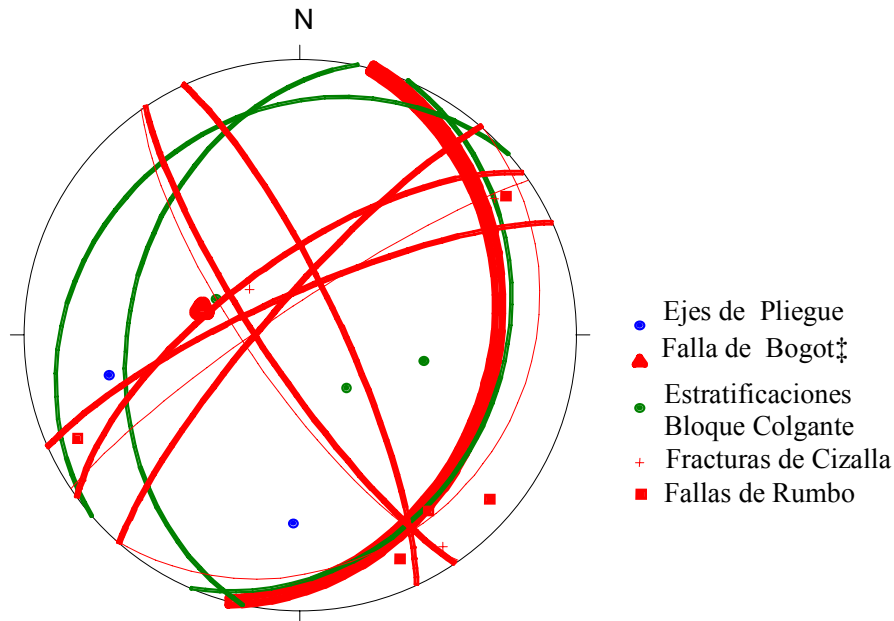


Figura 6-2. Estereográfama que resume el sistema estructural para el bloque colgante de la Falla de Bogotá en el área de San Cristóbal (tanques del Acueducto).

Lo anterior indica que la Falla de Bogotá para este sector, es una falla que alcanzó niveles cercanos a su configuración actual en tiempos del Mioceno es decir, para en el episodio que levantó la Cordillera oriental en su conjunto. Esta estructura fue el resultado de la primera fase deformativa, asociada al evento principal de levantamiento en la sabana de Bogotá.

- Falla de San Cristóbal

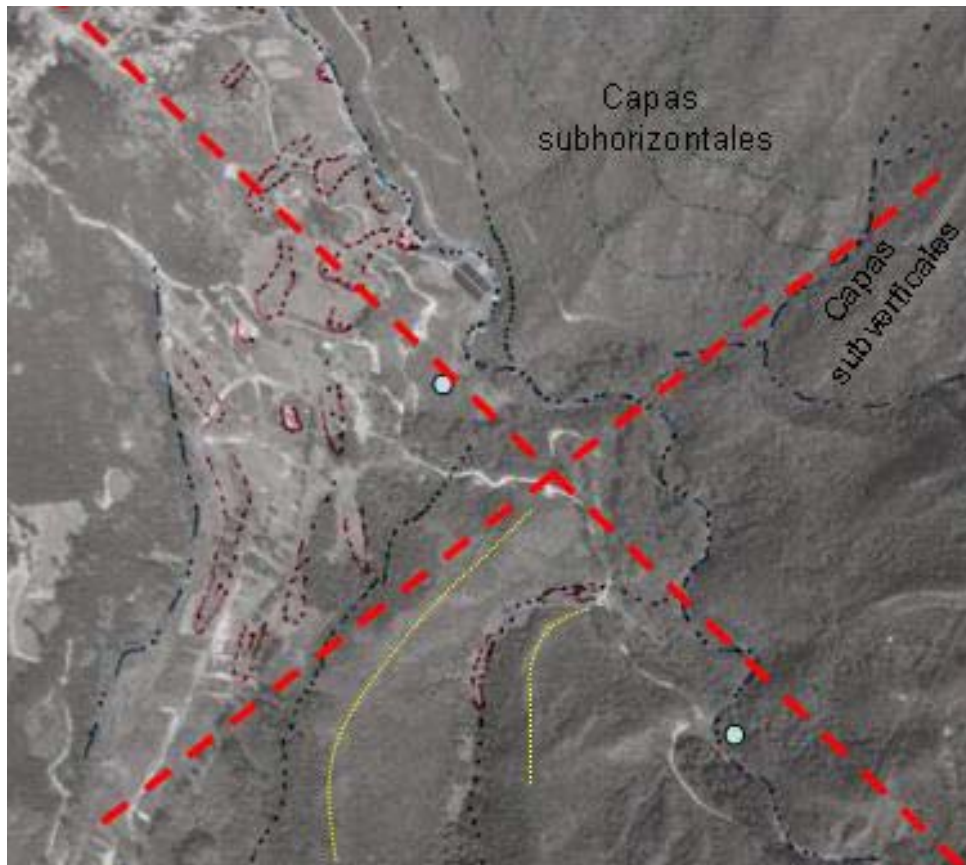


Figura 6-3. Aspectos geológicos (cambio de dominio estructural de capas, de subhorizontales a subverticales) y geomorfológicos (ganchos de flexión, marcados en líneas amarillas) que permiten deducir fallamiento.

Esta falla ha sido propuesta de manera preliminar por INGEOMINAS (1988) como una de las principales estructuras secundarias en los Cerros Orientales de Bogotá.

Morfotectónica

Los rasgos morfológicos relacionados con la Falla de San Cristóbal incluyen alineamiento de valles, lomos y cursos de agua (especialmente los ríos Fucha y la quebrada La Upata) a lo largo de más de 30 km. Además muestra ganchos de flexión evidenciados especialmente sobre la Formación el Cacho, la cual muestra desplazamientos sinestrales en el sector del Yuste y la Escuela de Logística.

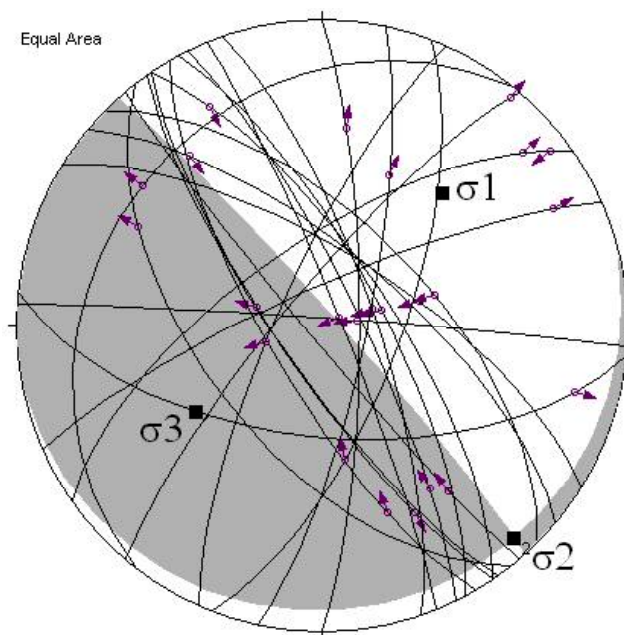


Figura 6-4. Soluciones de planos de falla para las fallas mesoscópicas registradas en el sector del acceso a San Isidro

Es probable que el cambio de curso del río Bogotá inmediatamente al sur del Aeropuerto El Dorado también esté relacionado con esta falla. Otros rasgos de interés son el afloramiento de rocas del Grupo Guadalupe a manera de islas dentro de la planicie de la Sabana al norte de este lineamiento.

El desplazamiento lateral izquierdo (sinistral) calculado a partir de rasgos morfotectónicos en la zona de El Yuste es de aproximadamente 300 metros.

Tectónica cinemática

El análisis cinemático de soluciones de planos de falla indican una contracción local σ_1 de 280/ 24, σ_2 de 76/64 y σ_3 de 184 / 8. Los planos de fallamiento teórico son 49 / 67 y 144 / 80, concordantes en orientación con las fallas de rumbo que conforman patrones conjugados, denotando las franjas de máxima extensión (franja sombreada) y de máxima compresión (Fanja blanca), como se observa en la Figura 6-5. Esta misma configuración de fallas de rumbo, da lugar a planos principales de cizalla de proporciones meso y megascópicos a la escala de la cartografía; los que dislocan claramente con sentido dextral la secuencia rocosa, (plano teórico 144/80), representan la faja de deformación causada por la Falla de La Osa, la cual es propuesta en este trabajo y conforma la segunda fase deformativa junto con la Falla de San Cristóbal, del evento principal del Mioceno.

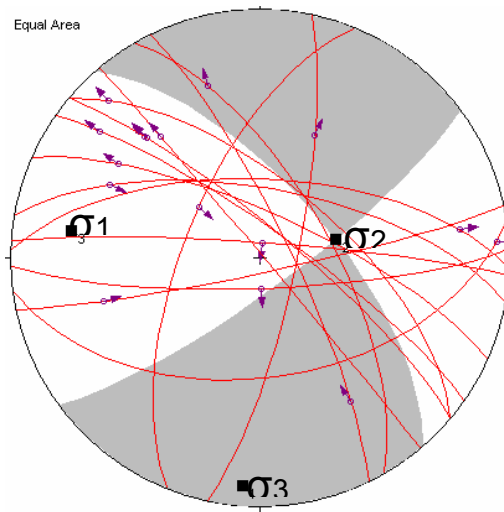


Figura 6-5. Soluciones de planos de falla para las fallas mesoscópicas registradas en la zona del río San Cristóbal.

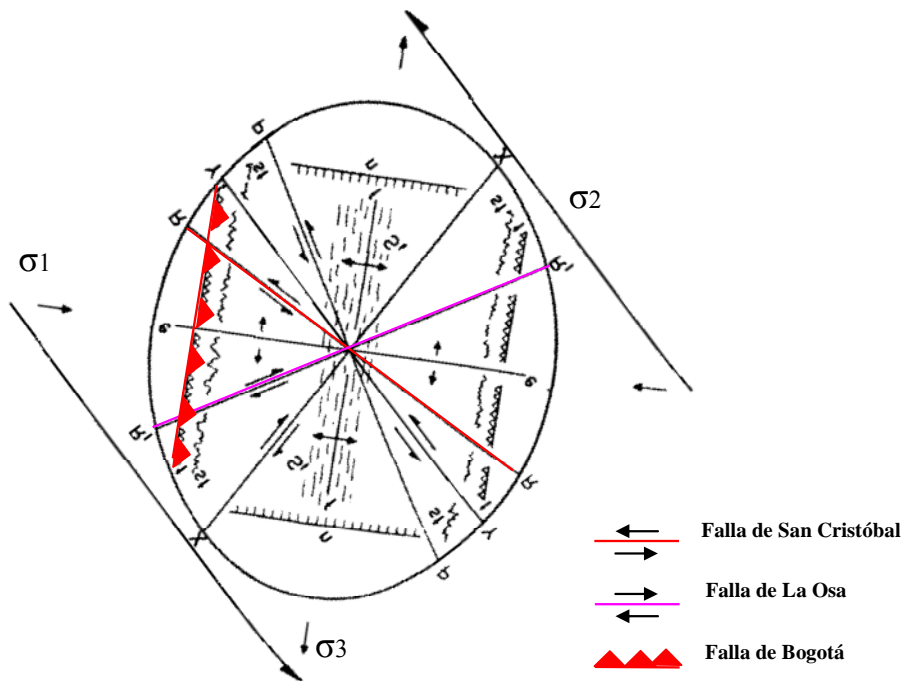


Figura 6-6. Solución teórica de planos de movimiento, para las fallas macroscópicas, representado el sistema sinistral para la Falla de San Cristóbal; basado en los resultados del análisis cinemática de los elementos registrados a escala de afloramiento.

Por otra parte con para la configuración de esfuerzos determinada, se desarrollan estructuras originadas por esfuerzos de tipo compresivo, cuyo rumbo es perpendicular a la dirección de σ_1 , es decir N15E; estas estructuras corresponden a fallas inversas, que conforman el sistema estructural asociado a la misma fase deformativa de la Falla de Bogotá (fase inicial). En la solución teórica (Figura 6-6), se relacionan esquemáticamente el resultado estructural de la configuración de esfuerzos propuesta.

- Falla de La Osa

Morfotectónica

Se propone esta falla a partir de la existencia de rasgos morfológicos que incluyen alineamiento de valles, lomos y cursos de agua (especialmente la quebrada de La Osa) a lo largo de más de 10 km.

En la cantera de El Zuque muestra desplazamientos dextrales de más de 100 metros, y diferencias de altura apreciables: el bloque norte aproximadamente 30 metros por encima del bloque sur.

Tectónica cinemática

El análisis cinemático de soluciones de planos de falla indican una contracción local σ_1 de 45 / 55, σ_2 de 210 / 34 y σ_3 de 305 / 7. Los planos nodales que limitan las franjas de máxima (blanco) y mínima (sombreado) compresión son 157/48 y 278 / 60 (Figura 6-7); Este patrón de fallas de rumbo NW de tipo sinistral, conjugado con el patrón NE de fallas de rumbo lateral derecho; constituyen el sistema estructural representativo para la segunda fase de deformación, que compone el evento principal de edad Mioceno, fase a la cual pertenecen las fallas rumbo deslizantes de San Cristóbal (Ingeominas, 1988) y La Osa (propuesta en este trabajo).

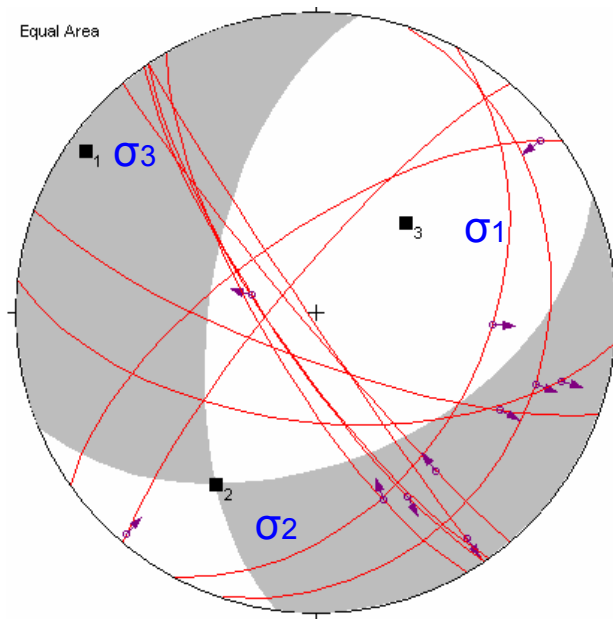


Figura 6-7. Soluciones de planos de falla para las fallas mesoscópicas registradas en el trayecto entre los cerros de Zuque y La Vega.

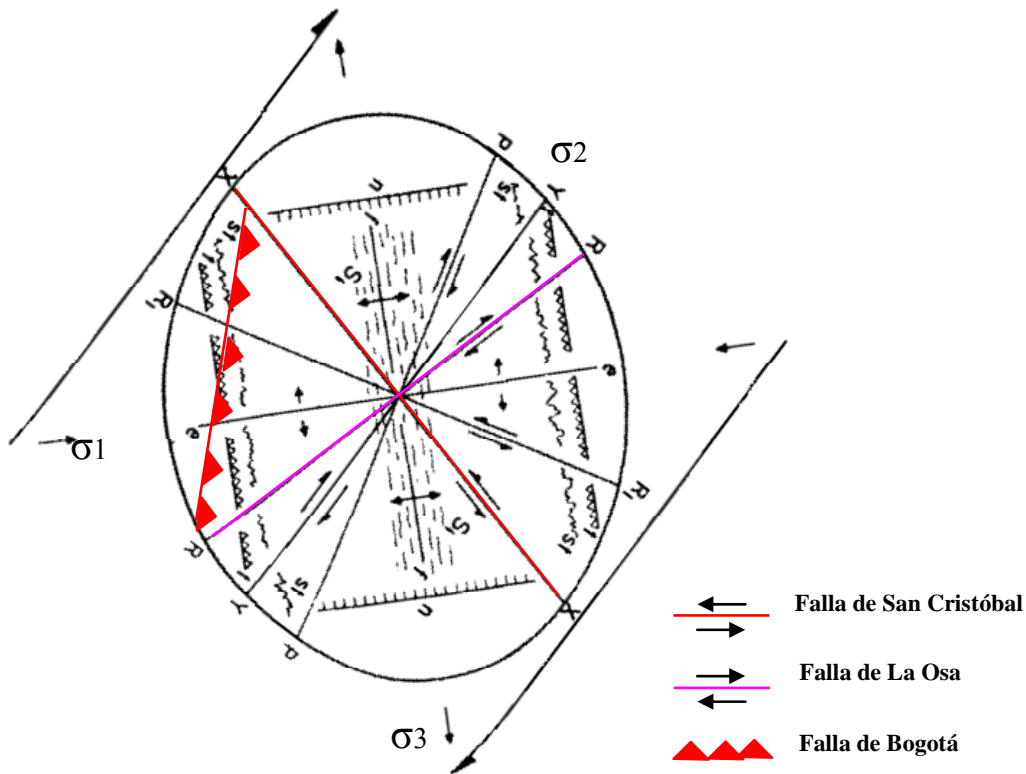


Figura 6-8. Solución teórica de planos de movimiento, para las fallas macroscópicas, representado el sistema dextral de la Falla de La Osa; basado en los resultados del análisis cinemática de los elementos registrados a escala de afloramiento.

La solución teórica, representa las estructuras formadas en un ambiente tectónico de rumbo con carácter dextral, según las características medidas y observadas en campo y a través de fotografías aéreas, que permiten delimitar su geomorfología y afectación al paisaje.

Pliegues

- Anticlinal de Bogotá – Usaquéen



*Fotografía 6 - 28. Anticlinal de Bogotá – Usaquéen, estructura apretada con inversión en sus flancos.
Vista de la cuenca montaña del río San Cristóbal*

Estructura apretada con dirección predominante N10E y con características inversiones en lo largo de sus flancos oriental y occidental, de hecho el anticlinal no tiene sus dos flancos normales en ninguna sección y si existen algunos tramos donde los dos flancos se encuentran invertidos.

El núcleo de la estructura está compuesta por las lutitas de la Formación Chipaque, flanqueada al oriente (Sinclinal de Teusacá) por las rocas resistentes del Grupo Guadalupe y las de la Formación Guaduas; al occidente también se encuentran las rocas resistentes del Grupo Guadalupe y además toda la secuencia cenozoica (formaciones Guaduas, Cacho y Bogotá)

- Sinclinal de Usme

Estructura amplia, con orientación principal cercana a la N-S y con inversiones en su flanco oriental (Anticlinal de Bogotá – Usaquéen) y también en el occidental. En general el flanco oriental se encuentra alineado, mientras que en el occidental los sistemas de fallas de rumbo con componente dextral que existen entre Soacha y el sector de Doña Juana dislocan de manera fuerte dicho flanco.

El núcleo de la estructura está compuesto por rocas de las formaciones Usme y Regadera.

- Sinclinal de Teusacá

Estructura amplia y suave, con el flanco occidental generalmente invertido y con el flanco oriental en posición normal y con buzamiento muy suave. En su núcleo afloran las formaciones Guaduas, Cacho y Bogotá.

Lineamientos fotogeológicos

Además de los rasgos lineares con comprobación de desplazamientos que permiten definirlos como fallas, existen lineamientos fotogeológicos con dirección promedio N45E y N45W, los cuales evidencian un sistema de debilidad conjugado.

Los lineamientos principales controlan los principales cursos de agua, tales como la Fotoga y La Uyata.

Como producto final, se presenta el Plano: Geología de la zona de estudio.

6.3 Geomorfología

La geomorfología es una disciplina que analiza los paisajes y los factores que los producen y modifican, especialmente para buscar soluciones a problemas generados en zonas donde cambian las condiciones de equilibrio. Ejemplo de ello son la ocurrencia de procesos de erosión hídrica concentrada por cambio en las coberturas vegetales y los cortes de taludes asociados con la apertura de vías o la actividad extractiva.

El paisaje de la zona de estudio es el producto principalmente de la combinación de procesos tectónicos relacionados con el levantamiento de la Cordillera Oriental y la conjugación de fallas, conformando una vertiente montañosa con laderas desde suavemente empinadas hasta escarpadas (dependiendo del tipo de roca sobre la que se desarrolla) y limitada por una zona plana correspondiente a la Sabana de Bogotá. Entre estas dos provincias estructurales existen abanicos de piedemonte, desarrollados probablemente con influencia de los procesos glaciales que afectaron las partes altas de la cordillera durante los últimos dos millones de años.

Un aspecto relevante para la zona de estudio en particular son las glaciaciones, las cuales han afectado el planeta en los últimos dos millones de años, con periodos entre los procesos de glaciación y deglaciación de aproximadamente

100.000 años. Los glaciales son agentes erosivos muy efectivos, arrancando y movilizandando gran cantidad de materiales pétreos; la acción de las lenguas glaciares sobre litologías arcillosas pueden ser el remoldeo de grandes espesores de material, que una vez inician los procesos de deshielo pueden convertirse en zonas susceptibles a los flujos de tierra.

En consecuencia, en el análisis de los aspectos geomorfológicos, se hace énfasis específicamente en la parte Morfodinámica, enfocada a la diferenciación de los diferentes cuerpos a los cuales se encuentran asociados procesos de remoción en masa y a la determinación de los factores que afectan la resistencia de los materiales, la intensidad de los procesos que actúan sobre ellos. Este producto se presenta en el Plano Geomorfología.

Consiste en la descripción de las formas del relieve de acuerdo a variables como: erodabilidad relativa, las formas del relieve (como insumo de este se presenta el Plano Morfometría que combina pendientes con curvatura), la relación de la red de drenaje con la disposición estructural de las rocas y el perfil de vertiente característico de las litologías, en un intento sistemático de clasificación desde formas regionales (provincias) hasta tipos de modelado dentro de cada provincia.

A continuación se exponen características genéticas de las formas, desde lo general (Altiplano Bogotá) hasta lo particular (zona de estudio)

Según Van der Hammen (1995) el altiplano denominado Sabana de Bogotá está situado a una elevación de aproximadamente 2550 – 2600 msnm en la Cordillera Oriental de Colombia. Dicho altiplano representa una gran cuenca tecto-sedimentaria la cual fue rellena por cientos de metros de sedimentos principalmente lacustres de edad Plioceno Tardío y Pleistoceno. El altiplano está rodeado en su totalidad por montañas que alcanzan localmente altitudes de casi 4000 m.

En general, la disposición litológica en los Cerros Orientales está determinada por estructuras alargadas (crestas) en sentido NS a NNE-SSW que aparecen cortadas por la mayor parte de los cauces en drenaje de tipo antecedente o drenajes controlados tectónicamente. El sistema de fallamiento principal relacionada con el ascenso cordillerano controla la disposición estructural mencionada y el fallamiento de rumbo posterior se refleja morfológicamente mediante alineamientos de cursos de agua y de lomos. Por otra parte, la Falla de Bogotá y sus fallas satélites separan dos provincias geomorfológicas (dominios) diferentes: la Cordillera y el Piedemonte; la separación entre el Piedemonte y la Sabana está relacionada con el relleno lacustre original del denominado Lago Humboldt.

6.3.1 Morfoestructural

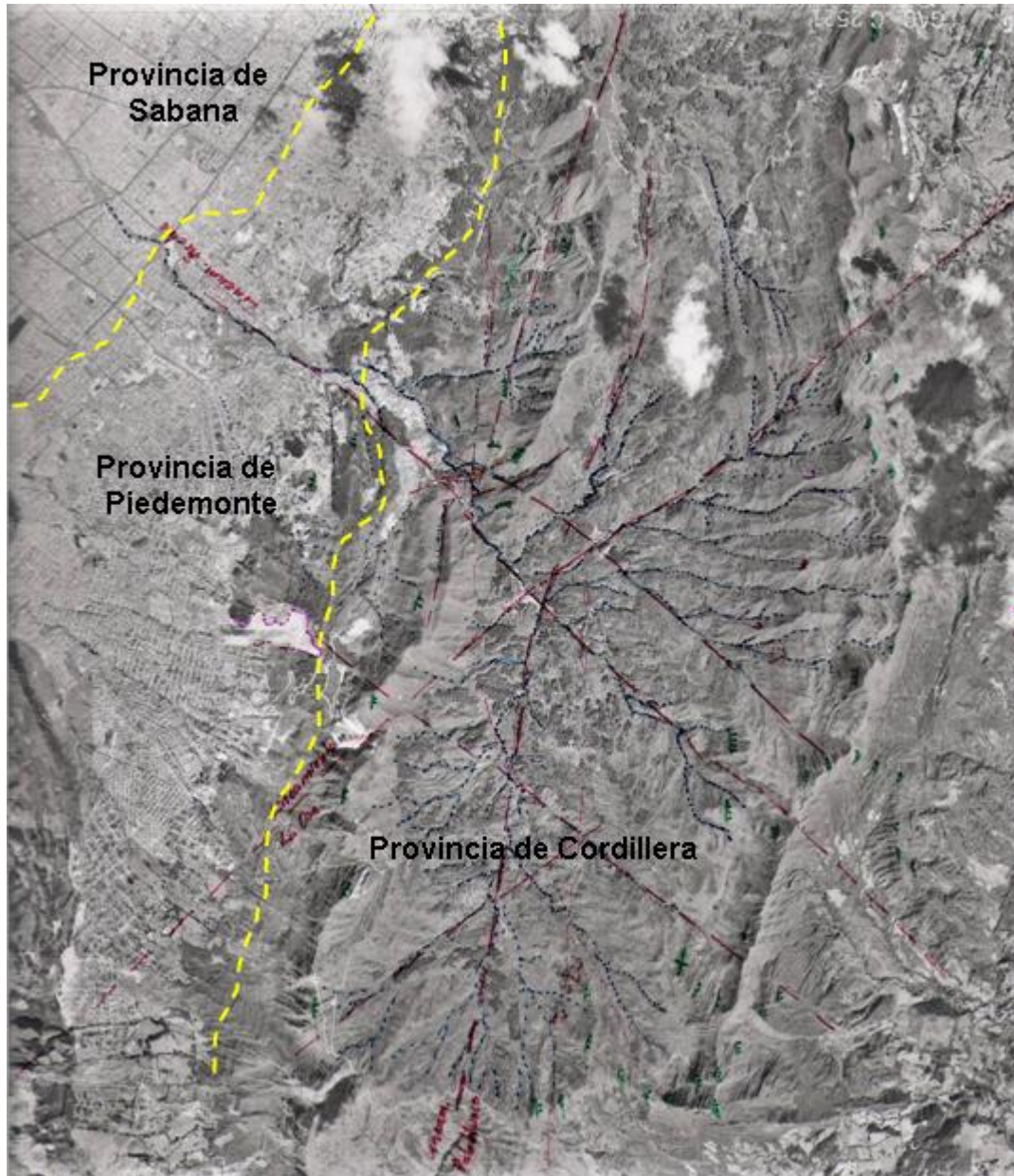


Figura 6-9. Dominios geomorfológicos esbozados sobre fotografía aérea. Nótese las formas abruptas de la Cordillera, marcadas por el afloramiento de rocas resistentes, en comparación con las formas menos evidentes del Piedemonte (aunque la urbanización mimetiza dichas formas)

Un aspecto muy importante relacionado con la geomorfología es el clima, íntimamente relacionado con la cobertura vegetal. Para la zona de estudio las altitudes superan los 2650 msnm y contiene dos tipos de franjas vegetales (Van der Hammen, 1995): la zona de bosque andino hasta aproximadamente 3300 msnm y la zona de páramo abierto por encima de esta elevación. La parte más húmeda de los bosques y los páramos es el área de ocurrencia de un grueso manto de suelo negro.

Dominio de Cordillera (Cerros)



Fotografía 6 - 29. Sierra de Bogotá, perteneciente al denominado Dominio de Cordillera en su parte más oriental. De izquierda a derecha: Monserrate, Guadalupe y El Aguanoso.

Se ubica hacia el oriente del área analizada, de manera general al oriente de la Falla de Bogotá. Se caracteriza por presentar una morfología de grandes montañas con alturas entre 2900 y 3600 msnm. Su ancho aproximado es de 4,5 km, entre la cuchilla formada entre La Viga y Cruz Verde y la Sierra de Bogotá.

Su morfología contiene diversos tipos de modelado, desde formas abruptas, con crestas alargadas, correspondientes a lomos producidos por rocas duras,

resistentes a la erosión glacial (modelado estructural); formas de intercalaciones de rocas duras con rocas blandas (modelado estructural – denudacional) y rocas blandas cubiertas por coluviones (modelado agradacional coluvial). Todas estas formas tienen influencia glacial, pues en los últimos 2 millones de años este dominio ha estado sujeto a más de un periodo cubierto por los hielos.

- Modelado estructural cordillerano



Fotografía 6 - 30. Modelado estructural, donde son evidentes y dominantes las estructuras geológicas (estratificación de capas gruesas de areniscas). Cerro de La Viga.

En general, se puede hablar de Modelados de tipo estructural (peñas, cuchillas, cerros, etc.) en las partes más altas de la cuenca (Sierra de Bogotá y el páramo ubicado entre Cruz Verde y el Cerro de La Viga), donde el afloramiento de las areniscas resistentes del Grupo Guadalupe definen las formas abruptas, es decir, el relieve marca las estructuras geológicas, que en este caso es la existencia de capas aproximadamente paralelas entre sí.

Este tipo de modelado se produjo por la acción de los hielos sobre macizos rocosos constituido por rocas duras (areniscas) en los últimos 2 millones de años.

Dependiendo del ángulo de inclinación de los estratos, las cuchillas se pueden presentar como cuchillas asimétricas o simétricas. En el primer caso el ángulo de buzamiento suele ser menor a 30° , y por tanto la pendiente estructural es mucho más extensa que el escarpe de contrapendiente o ladera erosional. Cuando el

ángulo de buzamiento es más alto ($> 45^\circ$) las dos laderas presentan una extensión más equitativa.

Este modelado bordea la parte montana de la cuenca mediante dos sierras: La occidental se ha denominado tradicionalmente la Sierra de Bogotá y tiene alturas entre 2900 y 3500 m y la constituyen los cerros de El Aguanoso (el más alto de la Sierra) y Diego Largo al norte del curso del río San Cristóbal y el Pileta, el Zuque, las Coloradas y La Teta al sur de dicho río.

La sierra oriental no tiene un nombre que la integre, es en promedio más alta (entre 3400 y 3600 m) y está compuesta, de norte a sur, por los cerros La Viga, Plazuelas, El Buitre, El Cajón y Cruz Verde (el de mayor altura).

La cima de las sierras y cuchillas es bastante aguda, dada la alta resistencia de los materiales geológicos que conforman este modelado ante los procesos denudacionales. Son poco comunes los procesos de inestabilidad representados por caídas de roca. Mención especial merecen los procesos generados por actividad humana (cortes viales) que producen deslizamientos planares de roca y caídas de bloques por mecanismos diversos (cuñas y planares) dependiendo de la interacción entre las discontinuidades del macizo rocoso y la dirección de los cortes.

- Modelado estructural-denudacional cordillerano



Fotografía 6 - 31. Modelado estructural-denudacional, con intercalaciones de capas resistentes con capas blandas. Cuenca alta de la quebrada La Osa, ladera abajo del Cerro Plazuelas.

Un modelado intermedio es el de tipo estructural – denudacional, donde las intercalaciones de materiales resistentes con materiales blandos llevan a la conformación de cuestas estructurales y escarpes de contrapendiente de poca extensión, intercaladas con zonas bajas blandas, alineadas en el sentido del rumbo de la estructura geológica.

Este tipo de modelado se relaciona con la parte baja de la Formación Arenisca Dura y la alta de la Formación Chipaque, y se ubica en las zonas marginales que separan los modelados con influencia estructural de los modelados denudacionales coluviales; la oriental de los cerros orientales y la occidental en la cuchilla ubicada entre La Viga y Cruz Verde, en rangos de altura entre 3200 y 3400 msnm, aproximadamente.

Esta zona presenta los mayores procesos dentro de este dominio, correspondientes a flujos de tierras y flujos de lodo, al parecer originados por la acción de presiones hidrostáticas en las interfases lodolitas-areniscas, que remueven lodolitas alteradas muy humedecidas y los materiales recientes (suelos con influencias coluviales, de cenizas volcánicas u orgánicos) que existen sobre ellas. Sin embargo, involucran espesores muy pequeños de materiales, con un máximo observado de 3 metros y dadas sus formas muy alargadas (con ancho máximo observado de 20 metros) no aportan un volumen de sedimentos representativo a los cursos de agua.

- Modelado glacial cordillerano



Fotografía 6 - 32. Modelado glacial, las formas abruptas se ven suavizadas por la depositación de materiales.

A pesar de que el modelado glacial es fundamental para toda la provincia de cerros, se restringe aquí éste tipo de modelado a las formas producidas por la depositación de los materiales arrancados y transportados por el hielo. Se ubican en alturas entre 3400 y 3450 msnm.

Produce formas suaves, de baja pendiente, con montículos redondeados aproximadamente paralelos entre si y que tienen la dirección de la máxima pendiente general de la ladera (morrenas). La inclinación de las morrenas varía entre 5 y 10° (medidos con nivel Abney) y la inclinación de los flancos es cercana a 13°.

No presentan procesos denudacionales, ni de remoción en masa, ni de erosión hídrica concentrada.

- Modelado denudacional – coluvial cordillerano



Fotografía 6 - 33. Modelado denudacional coluvial, con formas suaves definidas por lutitas y cubiertas por coluviones producto de procesos denudacionales variados.

La zona central de la cuenca montana está definida por modelados denudacionales (sobre lutitas de la Formación Chipaque) los cuales producen coluviones de espesores variables. Se ubican en alturas entre 2950 y 3400 metros en la parte más baja de la cuenca montana.

Presenta procesos denudacionales, especialmente deslizamientos traslacionales lentos. También sobre esta unidad se presentan procesos de erosión hídrica concentrada por arrastre de materiales producidos por deslizamientos y por flujos de tierra que llegan a los cursos principales. Estos sólidos suministran herramientas que hacen mucho más eficiente el proceso erosivo. Sin embargo, es pertinente anotar que los procesos erosivos afectan únicamente las cabeceras de las cuencas menores y no se han propagado hasta los cursos principales (al menos durante los últimos 60 años)

Dominio de Piedemonte

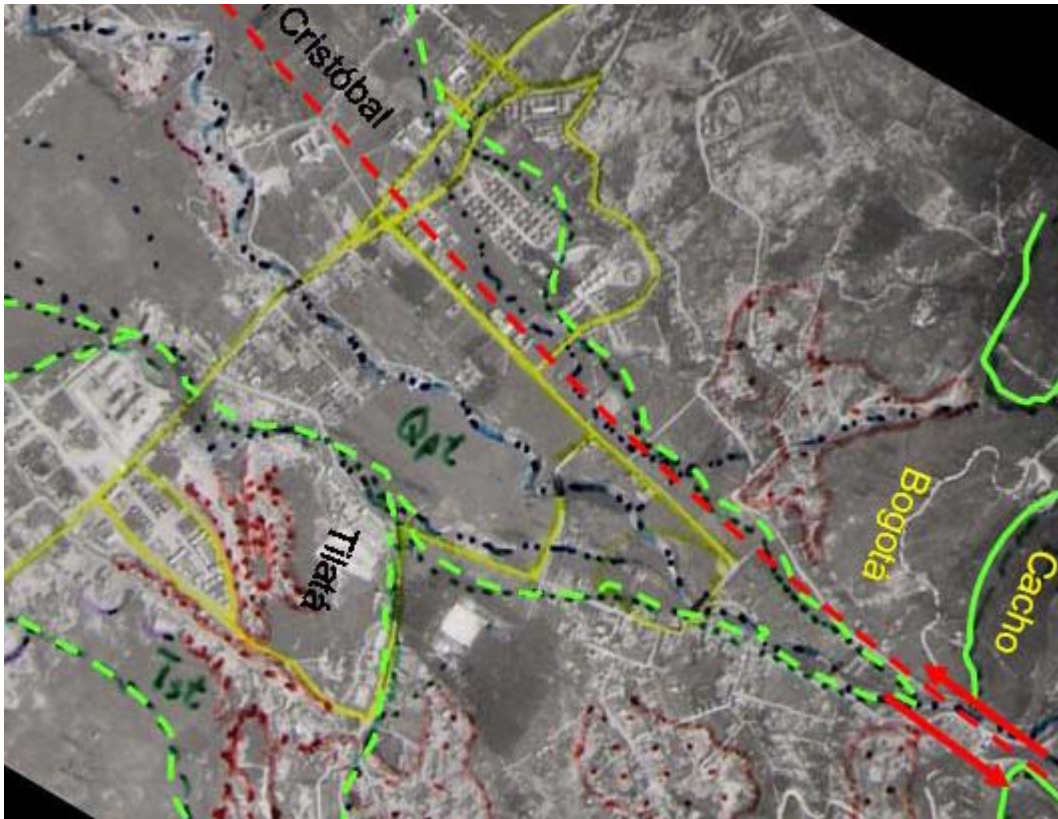


Figura 6-10. Dominio de piedemonte, con abanicos aluviales y formas predominantemente denudacionales sobre materiales arcillosos.

Es una franja alargada en sentido general Norte – Sur, con un ancho aproximado de 3 km, limitada al oriente por el trazo de la falla de Bogotá (que define el límite occidental de la Falla de Bogotá) y al occidente por los materiales lacustres que definen la Sabana de Bogotá. Aunque es más heterogénea que la anterior, se caracteriza en general por una morfología suavizada (modelado denudacional) heredado de procesos de erosión y remoción en masa desarrollados sobre rocas arcillosas, aunque también contiene formas abruptas, con crestas angostas alargadas (desarrolladas sobre areniscas), paralelas al sistema de fallamiento en altitudes que van de los 2700 a los 2900 m.s.n.m.



Fotografía 6 - 34. En primer plano, Dominio de Piedemonte, marcado por formas positivas de baja altura. Al fondo, la extensa planicie lacustre que define el Dominio de Sabana

- Modelado estructural piedemontano (lomas)

Existen lomeríos estructurales en la parte media de la cuenca, con el afloramiento de areniscas moderadamente resistentes correspondientes a la Formación Cacho (zona de San Jerónimo del Yuste). Son formas muy particulares y evidentes: lomas estrechas (200 metros de ancho) muy alargadas formadas por el afloramiento de las areniscas de la Formación Cacho, entre litologías arcillosas de la Formación Guaduas y de la Formación Bogotá.

Previa a su intervención antrópica (actividad extractiva en zonas como El Yuste) no presentaban evidencias de procesos denudacionales. La extracción de materiales causó la inestabilidad de algunas zonas, especialmente la caída de bloques, lo cual ha llevado a la necesidad de cuantiosas inversiones de reconformación geotécnica para actividad urbanística.



Fotografía 6 - 35. Lomos estrechos y alargados, con alturas menores de 50 m, propios del modelado estructural Piedemontano. Sector de San Jerónimo del Yuste.

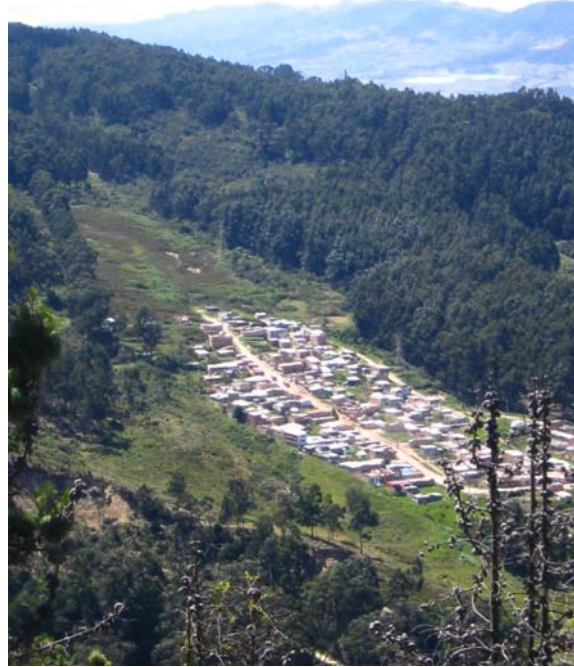
- Modelado denudacional-coluvial piedemontano

Este es el modelado predominante de esta Provincia geomorfológica, marcada por la existencia de litologías arcillosas (formaciones Guaduas y Bogotá) afectadas a lo largo del tiempo geológico por procesos denudacionales fundamentalmente lentos (deslizamientos y flujos de tierras). Este modelado se presenta como dos franjas alargadas separadas por los lomeríos estructurales de la Formación Cacho.

La franja oriental tiene un ancho de aproximadamente 500 metros, con bajas pendientes (marcadas por el ángulo de fricción residual de los materiales arcillosos que la componen), afectada por grandes flujos de tierra, la mayor parte de ellos en estado latente.

La franja occidental tiene un ancho variable entre 1,3 y 2,5 km y ha sido una zona muy afectada por actividad extractiva de baja magnitud: innumerables chircales han existido desde los albores del siglo XX, los cuales nunca han tenido un planeamiento técnico (Royo y Gómez, 1942), razón por la cual han detonado procesos tales como flujos de tierra, deslizamientos y caídas de bloques, especialmente dado que el principal sistema extractivo ha consistido en el despate de taludes. La parte más oriental de esta franja, corresponde predominantemente a arcillas de la Formación Tilatá; estos materiales son muy susceptibles a la

erosión hídrica concentrada, razón por la cual presentaba grandes rasgos de carcavamiento antes de su urbanización.



Fotografía 6 - 36. Formas suaves, rugosas, con evidencias de procesos de remoción en masa lentos, propias de las formas denudacionales coluviales del Piedemonte. Zona del barrio Aguas Claras.

- Modelado aluvial piedemontano



Fotografía 6 - 37. Formas planas suavemente inclinadas, correspondientes al abanico del Río San Cristóbal

La zona baja de la cuenca está caracterizada por procesos agradacionales, aluviales torrenciales en el caso del abanico del río Fucha. Este abanico es alargado, con pendiente menor de 2° y ancho máximo dentro de la zona de estudio de 800 metros.

El río San Cristóbal tiene un abanico aluvial muy bien desarrollado, en que un predominio de carga gruesa (gravas y arenas) producida por los procesos glaciares, fue transportada y depositada por un río con patrón probablemente trenzado (las facies de gravas son típicas de estos tipos de cauce) formando los depósitos gruesos de la Formación Río Tunjuelito. Es posible que parte de este abanico (o durante ciertos periodos de tiempo su totalidad) estuviera cubierto por las aguas de la Laguna de Bogotá, con lo cual habría existido un delta lagunar. Lo anterior está comprobado en el abanico del río Tunjuelo por la presencia de algunas intercalaciones de material fino lacustre dentro de la secuencia de gravas.

Al modificarse las condiciones climáticas con el inicio del actual periodo interglacial, la Laguna de Bogotá se secó de manera progresiva (es de esperarse que en las zonas marginales, tal como la zona de estudio, este proceso haya ocurrido primero) al tiempo que finalizaban los procesos glaciares de montaña en la zona de vertiente, con lo cual se modificaron de manera total las condiciones de carga sedimentaria y de pendiente del río a su paso por la Sabana,

transformándose en lo que era antes de la intervención antrópica que lo canalizó: un canal de tipo semimeándrico confinado por los escarpes creados por su propio entallamiento, el cual es de 10 m.

Los procesos denudacionales típicos se relacionan con la socavación lateral, la cual causa desprendimiento y caída de materiales aluviales o de depósitos antrópicos.

Dominio de Sabana

- Modelado lacustre

De acuerdo con Van der Hammen (1995) la sedimentación en la cuenca de la Sabana de Bogotá comenzó hace aproximadamente 3,5 millones de años. Inicialmente tuvo lugar en los valles exteriores, es decir, en cuencas marginales pequeñas. Hace aproximadamente 3 millones de años cuando el levantamiento principal de la cordillera cesó, la sedimentación comenzó también en la parte central del altiplano. Durante los 1,5 millones de años siguientes hubo un desarrollo gradual de una gran cuenca sedimentaria en la cual los sedimentos se dispersaron progresivamente sobre áreas cada vez mayores. Inicialmente se depositaron sedimentos fluviolacustres pero luego prevalecieron condiciones lacustres. Un marcado descenso en el nivel del lago, que comenzó hace aproximadamente 40.000 años y terminó hace aproximadamente 27.000 años condujo a la desaparición del mismo.

El resultado de la desecación del lago fue una gran llanura lacustre prácticamente plana, entallada por los cursos de agua que la atraviesan. Dicho entallamiento produce las denominadas terrazas, separadas por barrancas o escarpes que dividen dos zonas planas, una alta y una baja.

6.4 Morfodinámica

Se describen los procesos que modifican el relieve y los agentes que inciden en estos cambios. Las definiciones se basan principalmente en la clasificación de Varnes (1978) con aportes de lo expuesto por Vargas (1999)

6.4.1 Meteorización

La meteorización es el conjunto de procesos externos (físico-químicos) que causa la alteración y desintegración de la roca in situ. Para el área de estudio, el factor principal de meteorización química es de tipo hídrico. Estos procesos modifican las propiedades físicas y químicas originales de cada litología, creándose condiciones que facilitan la incisión del agua en los materiales que pierden cementantes y por lo tanto se hacen más susceptibles a la erosión y a los procesos de remoción en masa.

Los productos de los procesos de meteorización son los suelos residuales, bien desarrollados en el caso de las lutitas y las lodolitas, especialmente las de la Formación Bogotá y las de la Formación Guaduas, donde los espesores de suelos residuales y de rocas alteradas pueden llegar a sumar 6 metros.

6.4.2 Erosión hídrica superficial concentrada



Fotografía 6 - 38. Surcos y pequeñas cárcavas sobre lodolitas de la Fm. Bogotá

El cárcavamiento es el proceso de erosión hídrica concentrada en estado avanzado de desarrollo, que forma canales de grandes dimensiones llamados cárcavas. Las cárcavas varían en dimensiones (ancho, largo y profundidad) dependiendo del tipo de material erosionado, la pendiente y la energía de arrastre de la corriente.

El cárcavamiento incipiente se refiere al proceso erosivo de cárcavas de menor tamaño e inclusive áreas con presencia de surcos y zanjones que suponen una etapa temprana en la formación de las cárcavas propiamente dichas. Al avanzar el proceso de erosión ocurre principalmente la profundización de los canales y en menor proporción la ampliación lateral de los mismos. En este estado, las cárcavas son fácilmente identificables y están asociadas por lo general a corrientes naturales. Este estado de desarrollo de la erosión hídrica es la que se ha denominado como cárcavamiento profundo.

En la cuenca montana, la mayor parte de los procesos morfodinámicos corresponden a la erosión hídrica concentrada que actúa sobre zonas previamente inestabilizadas. A éstos se asocian flujos de detritos que entallan sobre los lechos de los cursos de agua que los reciben y que además se transportan aguas abajo potenciando la socavación lateral de las corrientes. Es importante anotar que el tamaño de los surcos y las cárcavas es pequeño y que los flujos de detritos asociados no tienen una extensión suficiente para alcanzar los cursos principales de las microcuencas.

Para la zona baja, en particular la cuenca de la quebrada Ramajal, la actividad extractiva ha dejado frentes libres denudados donde la erosión se produce por la ausencia o la deficiencia en el manejo de aguas superficiales y la ausencia o deficiencia en la cobertura de las zonas denudadas con vegetación lleva a la incisión preferencial de superficies expuestas, sean estas en zonas de taludes o en zonas de patio. La erosión se observa en casi la totalidad de las zonas afectadas por la actividad extractiva y en los taludes temporales es inherente a la actividad de extracción.



Fotografía 6 - 39. Enjambre de cárcavas ubicado en la cabecera de la quebrada La Osa.

Para ilustrar la relación de procesos erosivos con los flujos de detritos se describe el enjambre de cárcavas situado en las cabeceras de la quebrada La Osa.

Se observan tres coronas principales con activaciones de múltiples eventos, descritos a continuación:

Los procesos más recientes involucran material heterogéneo clasto soportado, con matriz arenosa de cuarzo de grano medio. Los clastos angulares son en promedio de 3x2 cm, con bloques hasta de 15x10 y 20x10 cm, de arenisca de grano grueso a medio y fino predominando estos últimos, y lodolitas silíceas en menor proporción. Su reciente ocurrencia se evidencia por la presencia de vegetación no marchita como musgos, helechos, etc, que fue arrancada. Hay flujos pequeños de agua, constantes y superficiales.

Los procesos temporalmente intermedios involucran material matriz soportado, con matriz arenosa de grano fino a medio con arcilla. Contienen clastos de cuarzoarenisca de grano fino a medio, con selección moderada a mala, subredondeados a subangulosos, y de arenisca de grano grueso blanca amarilla. La humedad es media-alta, y la plasticidad baja. Sobre ellos ha comenzado a crecer vegetación lo que evidencia su estabilidad por un tiempo, y son cubiertos por los materiales movidos en los últimos eventos.

Los procesos más antiguos se caracterizan por estar cubiertos por una capa de suelo negro hasta de 60 cm, de arena fina lodosa de cuarzo con porosidad alta,

consistencia media, alta humedad, plasticidad baja. El suelo cubre un material lodo arcilloso, matriz soportado con clastos de 2 a 3 cm, de plasticidad alta-media y humedad alta. Se encuentran bloques angulares de hasta 50-70 cm de largo de cuarzoarenisca de grano medio, porosidad por disolución de fósiles, bien seleccionada, color amarillo, con lentes de arenisca de grano grueso, bioperturbada.

A partir de mediciones con GPS en los puntos extremos del flujo de detritos se calcula una longitud total del área afectada de 160 m y un ancho de 116 m. Ninguno de los procesos más recientes en esta zona tiene alcance suficiente para proveer material a los afluentes directos del río.

6.4.3 Remoción en masa

Existen multitud de formas de procesos de remoción en masa. Se enuncian desde los más lentos hasta los más rápidos.

Reptación

Es el movimiento lento e imperceptible del material (roca o suelo) pendiente abajo, bajo la influencia de la gravedad. La reptación de suelos es una forma de remoción en masa que puede actuar sobre toda una ladera. Incluye el movimiento de suelos como fluido viscoso o plástico (Chorley et al., 1984). En este proceso, no hay una superficie de falla definida.

La reptación se manifiesta como desplazamiento muy lento de la parte superficial del terreno, aún en taludes de pendiente moderada y con cobertura vegetal. El proceso puede pasar inadvertido puesto que tiene velocidad promedio cercana a 1 cm/año; puede ser prácticamente nulo en algunos períodos, por ejemplo en veranos prolongados y activarse en tiempo lluvioso hasta 5 cm/año, según el tipo de material que conforma la ladera. El movimiento se evidencia por la deformación del terreno, la formación de pliegues en las formaciones rocosas o de arrugas y escalones en las masas de suelo, la inclinación de árboles, separación del suelo en el contacto con grandes rocas y la migración de estas.

En la zona de estudio, este proceso se presenta en pequeños parches potrerizados, ubicados adyacentes a las viviendas de los guardaparques, desarrollados sobre litologías arcillosas y suelos residuales y coluviales asociados a ellas.

Flujos de tierra



Fotografía 6 - 40. Parte terminal de un flujo de tierras, socavada por el río San Cristóbal.

El movimiento se caracteriza por la velocidad relativamente baja y por desarrollarse sobre “material proveniente de meteorización, que pierde su estabilidad estructural por efecto del agua, originando desplazamientos con formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior”

Los flujos de tierra más importantes se encuentran en la zona de Aguas Claras, desarrolladas sobre suelos arcillosos, residuales o coluviales, correspondientes a la alteración de arcillolitas de las formaciones Bogotá y Guaduas. Algunos de estos flujos llegan hasta el cauce principal del río San Cristóbal, el cual arrastra las lenguas terminales de dichos procesos y facilita el movimiento.

También existen flujos de tierra sobre coluviones y suelos residuales arcillosos producidos por la alteración de las lutitas de la Formación Chipaque (El Delirio) y de la Formación Plaeners (San Isidro). Al parecer estos procesos se encuentran en estado de latencia.

Deslizamientos

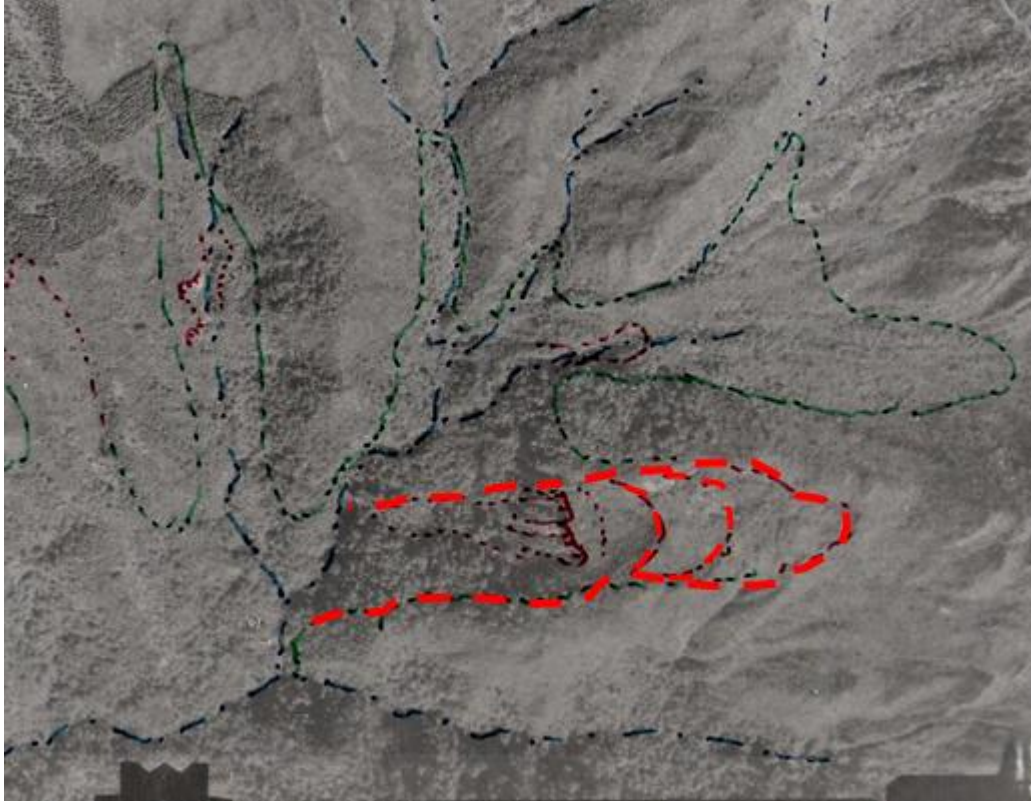


Figura 6-11. Deslizamiento complejo con importante componente rotacional, ubicado en las cabeceras de la quebrada La Osa.

El movimiento consiste de deformación por corte y desplazamiento, a lo largo de una o varias superficies que son visibles o pueden inferirse razonablemente, o dentro de una zona mas o menos estrecha. La rotura del talud no siempre es simultánea en todos los puntos de la superficie de falla, sino que puede propagarse desde una zona de falla local. La masa afectada puede deslizarse mas allá de la superficie original de rotura sobre el terreno natural (Invias, 1998).

Los deslizamientos presentes en la zona de estudio se clasifican, de acuerdo con su forma de ruptura como:

- Deslizamientos rotacionales

La superficie de ruptura es circular o semicircular y cóncava hacia arriba. El movimiento se efectúa por rotación alrededor de un eje paralelo al talud. Si este

mecanismo presenta varias superficies de ruptura se denomina deslizamiento rotacional múltiple, y si su forma de avance es ladera arriba será un deslizamiento rotacional múltiple retrogresivo. Este movimiento se presenta principalmente en materiales aproximadamente homogéneos, tales como suelos residuales arcillosos.

Se tienen evidencias de un deslizamiento de magnitud mediana que afectó las cabeceras de la quebrada La Osa, el cual fue visitado, evidenciando su cicatrización total.

- Deslizamientos traslacionales

Se relación con movimientos en los cuales la superficie de ruptura coincide con una superficie estructural, como un plano de buzamiento de una falla geológica, un plano de estratificación, un plano de diaclasa, etc. En este movimiento, la masa deslizada se efectúa por traslación sobre el plano de falla. A diferencia de los rotacionales, en los traslacionales es inherente la heterogeneidad de los materiales involucrados.

El proceso de deslizamiento traslacional activo más grande del área de estudio se encuentra asociado a una cantera en areniscas y lodolitas ubicada en el acceso a San Isidro. Aunque el mecanismo general es de tipo traslacional, el proceso involucra caída de bloques y caída de detritos.

Las dimensiones (medidas con cinta métrica) son longitud: 17m, ancho: 50m, altura: 20m, masa desplazada con espesor promedio de 2 m.



Fotografía 6 - 41. Deslizamiento traslacional ubicado en una antigua cantera, ubicada entre San Isidro y Aguas Claras.

El material de caída incluye bloques del coluvión antiguo y suelos negros con su respectiva cobertura vegetal. Forma un depósito coluvial matriz soportado, con matriz arcillosa, proveniente de la meteorización de las lodolitas infrayacentes con bloques de areniscas y fragmentos de suelo orgánico actual. Los materiales que conforman la corona del deslizamiento corresponden a 40cm de coluvión con influencia de cenizas volcánicas y 8 m de coluvión antiguo, de consistencia dura y fisuras que facilitan la caída de bloques.

- Deslizamientos planares

Se presentan cuando la superficie de ruptura sigue un plano de discontinuidad litológica como el contacto suelo - roca, roca meteorizada - roca fresca o siguiendo intercalaciones de litologías de menor resistencia dentro de macizos rocosos con litologías resistentes, el cual es el caso de los pequeños deslizamientos relacionados con cortes viales en la zona de La Viga.

Flujos de detritos o de lodo



Fotografía 6 - 42. Flujo de detritos ubicado en las cabeceras de la quebrada La Osa.

Es común que cuando una masa de detritos se ablanda por acción del agua hasta tener una consistencia blanda o fluida, se pone en movimiento, alcanzando velocidades altas, que dependen de la intensidad y duración de las lluvias y de la pendiente del terreno. Algunos flujos de detritos y flujos de lodos presentan avances sucesivos, como en oleadas, los cuales pueden deberse al empuje repetido por movilización periódica de materiales en el área de alimentación o por el represamiento periódico y su posterior liberación en las partes bajas (Invias, op. cit.).

Los flujos de lodo pueden ser generados de muchas maneras:

- Aguaceros torrenciales sobre depósitos de fragmentos no consolidados que existen en las zonas montañosas.
- Colapso de presas formadas por flujos de lava, lahares, movimientos en masa, acumulación de desechos, etc.
- Incorporación de detritos en crecientes o riadas causadas por lluvias.

Para ilustrar estos procesos se describe el flujo de detritos ubicado en las coordenadas (corona): 1.004.910mE – 996.345mN:

En la corona existe componente planar a lo largo de la estratificación. Este proceso involucra suelos negros con influencia de ceniza volcánica y material vegetal, y material del sustrato rocoso, con un ancho de 6m. A medida que se desciende por el flujo aumenta el contenido de fragmentos pétreos. Dentro del material desplazado se observan además de suelos orgánicos, fragmentos de areniscas y limolitas silíceas. Hacia el final del flujo, el material transportado llega al cauce principal de la quebrada formando un escarpe de aproximadamente 20m entre el lecho del flujo y el de la quebrada; esta diferencia puede ser explicada teniendo en cuenta la génesis de la zona y es la de valles colgados, propios de zonas anteriormente glaciadas.

Caídas y desprendimientos



Fotografía 6 - 43. Obras de mitigación para caída de bloques (San Jerónimo del Yuste).

Una caída representa la disgregación rápida de un volumen de material litológico a lo largo de una superficie sobre la cual ocurre muy poco desplazamiento cortante. Este movimiento ocurre sobre taludes verticales, sub-verticales o en voladizos, donde la gravedad constituye el principal agente motor del movimiento. Las caídas, desprendimientos o desplomes son generados por procesos similares; ellos se distinguen solamente por la magnitud del proceso.

Las caídas son generalmente movimientos intermitentes en caída libre, asociados a escarpes de macizos rocosos con material litológico resistente y que presentan fracturamiento moderado a intenso; el volumen de material afectado es

generalmente bajo y representa fragmentos independientes (cantos a bloques, y excepcionalmente, megalitos).

En los desprendimientos se produce una disgregación de masa litológica ya sea de suelo o roca fracturada y existe un descenso súbito con fragmentación del material a lo largo de una ladera de fuerte pendiente.

En los desplomes hay una disgregación de una masa litológica generalmente rocosa y de volumen considerable y forma en la base o pie un depósito caótico de material grueso.

Se pueden producir caídas de bloques en zonas no afectadas por extracción y que tienen pendientes mayores de 45°. Sin embargo, este proceso es típico de las zonas de antiguas canteras o chircales, donde se han hecho despates de taludes.

Como resultado de este proceso se generó el Plano: Inventario de procesos morfodinámicos y en el Anexo C -3. se presenta el análisis multitemporal de las fotografías aéreas.

6.5 Geotecnia

6.5.1 Eventos previos

En este apartado se consigna, de manera sintética, el trabajo de recopilación de la información histórica de los eventos relacionados con procesos de remoción en masa (PRM) en la localidad de San Cristóbal y los conceptos técnicos, que fueron realizados para las zonas de mayor influencia por dichos procesos por parte de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE).

Para inventariar la información se recurrió al SIRE (Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Atención de Emergencias), que es la plataforma informática del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. El SIRE, posee información histórica de emergencias recopilada por la entidad, entre ellas la relacionada con PRM, además en su base de datos, cuenta con estudios realizados por empresas privadas para la entidad, en particular el realizado por INGEOCIM, titulado “Zonificación de Riesgos por Inestabilidad del Terreno Para Diferentes Localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá; 1998”, del cual se hablará más adelante.

Una vez filtrada la información para la localidad de San Cristóbal, se procedió a utilizar a profesionales en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para

georeferenciar aquellos procesos que se encuentran dentro del área de estudio de la cuenca del río San Cristóbal.

Se debe aclarar que los procesos que se encontraron y recopilaron, pertenecen al área urbana de la zona de estudio y que los procesos que se presentaron en la parte rural (predios propiedad de la Empresa de Acueducto de Bogotá), no cuentan con un registro histórico conocido.

Registro Ingeocim

El registro de procesos recopilados por Ingeocim, surge del procesamiento de información de medios escritos y del trabajo hecho por la Corporación ODIC para el Hábitat y la Cultura; 1993, para la UPES (Unidad Para la Prevención y Atención de Emergencias de Santa Fe de Bogotá). El resultado se presenta en la Tabla 6-1.

Registro SIRE

El SIRE, posee una base de datos de los eventos que ha atendido desde 1997 hasta los que se han aprobado en 2007. Estos eventos nombrados DI (diagnósticos o informes de visita), son registrados en un formato que contiene ubicación geográfica, descripción del proceso y recomendaciones.

El trabajo de depuración de la base de datos del SIRE para los Diagnósticos o Informes de Visita (DI), consistió en la identificación y clasificación de los elementos de cada proceso en particular, entrando en detalle y categorizando aspectos como ubicación espacio-temporal, litología, tipo de movimiento, morfometría, causas, daños y gestión de riesgo. Esta información está limitada por la forma como se toma la información del evento por parte de la DPAE. Además, se montaron en el SIG, aquellos eventos que sucedieron dentro del área de estudio. En la Tabla 6-2., se presenta una muestra del inventario y en el Anexo C - 4 el total de los eventos.

También están cargados en el SIRE, los CT (conceptos técnicos), correspondientes a estudios de amenaza y riesgo. Estos se depuraron y referenciaron como se presenta en el Anexo C - 4, con el único fin de identificar cuales de ellos están dentro del área de estudio y así ubicarlos fácilmente si se necesita información complementaria de zonas específicas.

Barrio	Coordenadas		fecha	causas	usos	viviendas	personas	infraestructura	Fuente
	E	N							
San Cristóbal			06-Abr-22					acued río san cristobal	Catalogo
Santa Ana Sur	999010	997770	04-Sep-36	lluvias	cantera		1 herido		Catalogo
San Cristóbal	998298	997104	20-Ene-56	falla geológica					Opes
El Triángulo	1000264	996040	25-Feb-56	lluvias	cantera				Max Henríquez
El Triángulo	1000253	995081	20-May-57	lluvias				15 mts	Opes
San Isidro	997450	996690	13-Jun-61	lluvias	cantera	7 viviendas	30 damnificados		Max Henríquez
20 De Julio	997680	996950	12-Nov-66	lluvias					Max Henríquez
Bello Horizonte	998140	996090	14-Nov-66	lluvias					Max Henríquez
Bello Horizonte	998507	995662	15-Nov-67						Opes
Managua	997210	996405	27-May-74				100 damnificados		Catalogo
Atenas	998550	995410	28-Jul-74			10	600 damnificados		Catalogo
Atenas	998400	995700	02-Oct-74	lluvias		10		carretera y serv públicos	Catalogo
Los Libertadores	998420	992945	16-Mar-86	lluvias		1	20 damnificados		Catalogo
San Martín De Loba	997954	994996	26-Ene-88						opes
Corinto	1000180	995800	03-Nov-88			26	50 damnificados		catalogo
Las Malvinas	997365	995228	30-Nov-88	lluvias					opes
San Martín De Loba	997610	995100	16-Mar-89	lluvias					Max Henríquez
Granada Sur	998786	996792	11-Mar-89						opes
Las Malvinas	997410	995298	15-Mar-89	lluvias					opes
Vitelma	1000070	997538	15-Mar-89						opes
La Concepción	999830	996610	16-Mar-89	lluvias					Max Henríquez
La Groana			16-Mar-89	lluvias		1 vivienda	150 afectados		Max Henríquez
San Martín De Loba	997610	995100	18-Nov-91	lluvias					Max Henríquez
El Triangulo	1000258	996036	11-Nov-91						opes
Las Malvinas	997390	995020	18-Nov-91	lluvias			144 personas		Max Henríquez
Quindío	999400	992780	18-May-94	lluvias					Ingeominas
Granada Sur	998357	996920	04-Feb-97						Upes
Urb Padua	998710	997140	12-Feb-97						Upes
Quindío	994410	996700	17-Feb-97						Upes
Bello Horizonte	998150	996200	23-Ago-97						Upes

Tabla 6-1. Inventario histórico PRM localidad de San Cristóbal [fuente SIRE]

referencia	barrio	dirección	fecha	numero de eventos	material de soporte y/o fallado	tipo de mecanismo	cobertura m2	volumen removido (m3)	altura taludes	pendiente general (grados)	detonante	efectos		gestión de riesgo				
												elementos afectados y numero	tipo de daño	medidas de mitigación			ayuda	
														evacuación	por evacuar	reubicar		
DI-2566	corinto	Carrera 16 C Este No. 29 – 82 Sur	16/10/2005	1	suelo y material heterogéneo	deslizamiento rotacional	150	2	3	70	aguas servidas, escorrentía superficial						4 postes de madera, 10 tablonces	
DI-2614	Malvinas	Carrera 2 No. 42-05 Sur	05/12/2005	1		desprendimiento de material	30	12	4	90	aguas lluvias							
DI-2615	corinto	Carrera 15B Este No. 29-21 Sur	05/12/2005	1	arcilla de alta plasticidad y consistencia baja	deslizamiento	50	10			aguas lluvias, fuga alcantarillado	sendero peatonal no estabilizado	1	perdida de soporte				
												acued y alcant	2	ruptura tubería				
DI-2619	manila	Carrera 16 Este # 8 – 34 Sur	11/01/2006	2	depósitos fluvio glaciales sobre roca arcillosa F. Guaduas	flujo de lodos	1800	15			50	aguas lluvias	vivienda recuperación	1	colapso parcial, material dentro de la vivienda			8 postes de madera
						flujo de tierras		8					vivienda no confinada	1	colapso muro de cerramiento			
DI-2855	malvinas III sector	Carrera 2 No. 41A – 04 Sur	27/06/2006	1	sedimentarias terciarias (secuencia arenó-arcillosa del conjunto inferior de la F.Regadera) niveles de suelos negros orgánicos o cubierta en general por una capa coluvial	hundimiento	150		3	30	aguas lluvias, desconfinamiento	vivienda recuperación	1	perdida de soporte			16 personas 2 familias	
				1		caída de bloques												
				2		flujo se tierras							1	perdida de soporte, grietas				
DI-2866	buenos aires	Carrera 3 Este No. 6 – 44 Sur	05/07/2006	1	arcillolitas de la F. Bogotá, con depósitos de suelos orgánicos de poco espesor y algunos depósitos de relleno	deslizamiento traslacional	200	30	5	40	aguas lluvias,							

Tabla 6-2. Muestra del inventario histórico (1997-2007) PRM localidad de San Cristóbal [fuente SIRE]

6.5.2 Inventario de procesos morfodinámicos

Reconocimiento preliminar de campo

Con el reconocimiento preliminar de campo, se buscó cuantificar las dimensiones del trabajo de inventario, programar los recursos necesarios para realizar la actividad en los tiempos disponibles para ello y adquirir una visión general de los procesos existentes, de los materiales y de los factores contribuyentes y detonantes.

El reconocimiento preliminar de campo permitió dividir el área de estudio en tres sectores, cada uno de ellos con características particulares en relación con la densidad de procesos, las facilidades de acceso y los rendimientos esperados.

El primer sector corresponde a la parte media y alta de las laderas, cuya principal característica es la de presentar una densidad relativamente baja de procesos morfodinámicos pero con una gran dificultad de acceso.

El segundo sector corresponde a la parte baja de las laderas que coincide en general con las márgenes del cauce principal y de sus afluentes, en el que existe una densidad de procesos mucho mayor que la del primer sector y que debido a la cobertura vegetal obliga a recorrer metro a metro cada uno de los cursos de agua, ya que sólo así es posible localizar y caracterizar los procesos de inestabilidad.

El tercer y último sector, corresponde a la zona urbana del área de estudio. Este sector está caracterizado por la gran intervención antrópica y por tener unas particularidades desde lo social y lo ambiental que hace que el trabajo de campo requiera de una logística especial, garantizando la seguridad de los profesionales, pero en el que los rendimientos son mayores dadas las facilidades de acceso que presenta.

Síntesis de los resultados obtenidos del inventario de procesos morfodinámicos

Dentro del sector geográfico cubierto se cartografiaron y caracterizaron 139 procesos morfodinámicos; 39 sobre el cauce principal de la cuenca, 5 en la Quebrada Laureles, 34 en la Quebrada La Uyata, 6 en La Quebrada la Osa, 3 en la Quebrada Ramajal (direccionada por tubería a partir de la antigua carretera a oriente). El resto de procesos (52) están localizados en las partes medias o altas de las laderas.

La mayoría de los flujos encontrados son de carácter superficial, e involucran volúmenes relativamente bajos de material, sin embargo, la sumatoria de todos

ellos adicionada a las características hidráulicas de los cauces y a las evidencias de represamientos por la caída del mismo material y de árboles, deja ver desde ya, cierta predisposición a una potencial avenida torrencial.

Con los datos que se tienen hasta el momento, se puede decir que en los depósitos coluviales se presenta la mayor densidad de deslizamientos, mientras que los factores contribuyentes a los procesos de inestabilidad más recurrentes son: La presencia de material plástico débil, el contraste de permeabilidad y de rigidez entre los materiales que componen las masas inestables y la orientación desfavorable de discontinuidades. A su vez, el principal factor detonante resulta ser la socavación de la pata de los taludes por las corrientes de agua.

Los procesos inestables típicos hasta ahora cartografiados se ilustran mediante las Fotografía 6 - 44.



Fotografía 6 - 44. Flujo de detritos sobre la margen izquierda de la Quebrada La Upata.



Fotografía 6 - 45. Flujo de tierra y detritos sobre la margen derecha de la Quebrada La Upata.



Fotografía 6 - 46. Flujo de detritos sobre la margen izquierda de la Quebrada Palo blanco.



Fotografía 6 - 47. Pata de un flujo de detritos y tierra en la parte alta de la Quebrada La Upata.

El detalle de las características de uno de los depósitos coluviales afectado por un proceso de inestabilidad se muestra en la Fotografía 6 - 48. y Fotografía 6 - 49., mientras que el principal factor detonante y algunas de las consecuencias de los procesos inestables, se muestran en la Fotografía 6 - 50. y en la Fotografía 6 - 51.



Fotografía 6 - 48. Aspecto de un depósito de origen coluvial típico en las márgenes de los cursos de agua



Fotografía 6 - 49. Detalle del material inestable de uno de los procesos morfodinámicos inventariados.



Fotografía 6 - 50. Socavación de la pata de un talud por corriente de agua.



Fotografía 6 - 51. Empalizada ocasionada por la caída y el arrastre de bloques y árboles, aguas debajo de un proceso morfodinámico inventariado.

La base de datos se presenta en formato digital en el Anexo B -2, junto con el Plano: Inventario de deslizamientos.

6.5.3 Análisis estadístico de la base de datos del inventario

Para el análisis de datos se utilizaron los 139 procesos de remoción en masa recopilados en el inventario de deslizamientos. Se utilizó como herramienta de análisis estadístico el software SPSS (Statistical Package for the Social Science). Los resultados de este análisis estadístico son presentados en el Anexo C -5.

En primer lugar se consideró la comparación de cada una de las variables, para establecer los rangos y valores en los cuales se caracterizan e identifican los procesos de remoción en masa en la cuenca. Posteriormente se realizó una comparación entre las 28 variables identificadas contra tres aspectos: cobertura vegetal, geología y por último con la geomorfología.

Descripción de cada variable.

El estado, el estilo y la distribución son los factores para evaluar la actividad del movimiento, se identificó que la mayor parte de los procesos en un 92.8% se encuentran en estado activo. En cuanto al estilo de los movimientos inventariados, el 87.1% corresponden a un proceso único, seguido de los procesos múltiples con

un 10.8%, los procesos complejos y compuestos tienen mínima participación (0.7%).

En el tipo de distribución de los procesos se observa que hay dos predominantes, el retrogresivo con un 49.6% y ensanchando con 35.5%, en menor proporción están el móvil con 5.8%, confinado con 4.3% y enjambre con 1.4% y por último el de menor ocurrencia es el progresivo con 0.7%.

La litología de los procesos corresponden en su mayoría en un 40.3% a material coluvial, seguido del material residual en 25.2% y en roca 22.3%, en menor cantidad el material aluvial (11.5%).

En ocasiones un evento de movimiento en masa involucra más de un tipo de mecanismo, se indica un primer tipo de movimiento que ocurrió y luego el movimiento que precede a éste. Los flujos son el primer tipo de movimiento que más se encontró en la zona en un 87.1%, los restantes en mucho menor proporción como son caída en un 5.0%, deslizamientos rotacionales y traslacionales en 2.9% y la reptación en un 1.4%. En este caso la mayoría de los procesos en un 96.4% no involucran un segundo evento, este segundo evento asociado se presentó sólo en un 3.6%, siendo 2.2% flujos y 1.4% caídas.

La geología de los procesos está conformada principalmente por depósitos coluviales (Qc) en un 55.4%, seguida en menor proporción por materiales de la Formación Bogotá (Tib) en un 12.9%, por la Formación Guaduas (TKg) equivalente a un 7.2%, la Formación Arenisca Dura (Ksgd) en un 5.8%, las Formaciones Chipaque (Ksch) y Río Tunjuelo (Qrt) en 5.0%, y por último están las Formaciones Cacho (Tic) y Arenisca de Labor (Ksgl) con una porcentage de 1.4% y 0.7%, respectivamente.

En la geomorfología de la zona de estudio, domina el tipo de modelado Denudacional - Coluvial en el dominio geomorfológico de cordillera (DCmdc) en un 41.2% y en el dominio de piedemonte (DPmdc) en un 33.8%.

En las causas del movimiento intervienen los factores condicionantes y detonantes de los cuales se encontró que: el principal factor condicionante de los procesos inventariados es el material plástico débil en un 45.3%, seguido por el material meteorizado (15.1%) y el contraste en permeabilidad de materiales (12.2%), luego están la orientación desfavorable de discontinuidades (9.4%), las lluvias (4.3%) y el material fisurado (3.6%).

Los factores detonantes que predominan son la socavación en pata talud por una corriente agua en un 54.7%, y las lluvias con 31.7%, luego en menor proporción están la excavación de la pata del talud, socavación de las márgenes de los ríos y

el mantenimiento deficiente del sistema de drenaje superficial con valor igual de 5%.

Se encontró que la mayoría de los procesos en un 56.1% no exhiben cobertura de ningún tipo, dentro de los que si presentan cobertura, la vegetación herbácea se encuentra en un 22.3% de los procesos y los matorrales en un 19.4%. En cuanto al uso del suelo la gran parte de la cuenca es una zona de reserva ambiental de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – E.A.A.B. por lo tanto el tipo de uso que predomina es el área protegida en un 85.6%, seguido del uso para vivienda en proporción mucho menor del 7.9%.

De los parámetros de la morfometría de los procesos se encontró que: El 46.3% de los procesos presentan una diferencia de altura corona a punta (m), menor a 7.5 m, y en un 24.7% entre 7.5 m – 13.0 m, lo que significa que el 70% de los procesos tienen una diferencia de altura corona a punta inferior a 13.0 m, de los restantes el 15.4% son mayores a 24.0 m. En cuanto a la longitud horizontal corona a punta (m) en el 44.1% de los procesos es menor a 8.0 m, el 22.1% está en un rango entre de 8.0 m -13.5 m, entonces un porcentaje igual al 66.2% de los movimientos tiene una longitud menor a 13.0 m, y el 19.9% de los demás es mayor a 25.0 m.

El fahrböschung ($^{\circ}$) es el ángulo con respecto a la horizontal de la línea que une la corona con la punta del movimiento en masa, se observó que predominan dos rangos de intervalos de 33° – 44° en un 39.7% y de 44° – 55° en un 27.9%. Por lo tanto cerca del 68% de los movimientos tienen fahrböschung entre 33° y 55° .

De la pendiente de ladera en post-falla medida en grados, en la mayoría de los procesos en un 34.3% y 30.6% está en los intervalos de 38° - 50° y de 50° - 62° respectivamente, lo que equivale que el 64.9% de los procesos tienen pendiente de ladera post-falla entre 38° y 62° .

En la cuantificación de la pendiente de ladera en pre-falla, medida en grados ($^{\circ}$) hay tres intervalos en los cuales se encuentran un alto porcentaje de los procesos: entre 48° – 60° el 29.4%, entre 24° – 36° el 26.5% y entre 36° – 48° el 25.7 %, se observa que la distribución de las pendientes de pre-falla en estos tres intervalos es bastante homogénea, por lo que el 81.6% de los procesos tienen pendiente de ladera pre-falla entre 24° y 60° .

En la dirección del movimiento en un 52.9% de los procesos es menor a 143° y mayor a 216° en una proporción de 38.3%. El azimut de los taludes encontrados es inferior a 72° en un 31.6% de los procesos, y esta entre 72° - 143° en un 20.3%, por lo tanto cerca del 52% de los procesos tiene azimut menor a 143° , y 37.5% son mayores a 216° .

De los parámetros que describen la superficie de ruptura se puede decir que: las profundidades de la superficie de ruptura - D_r (m) corresponden en su mayoría en un 73.5% a valores menores a 2.1 m. El ancho de la superficie de ruptura (W_r) es menor a 15.0 m en un 35.1% de los casos, y está entre 15.0 – 29.0 m un en un 28.4%, lo que constituye un ancho de superficie menor a 29.0 m en un 63.7% de los procesos. Las longitudes de la superficie de ruptura - L_r (m) en un 37,6% están entre 5 - 8 m y 17.3% son menores a 5.0 m, luego en 54.9% de los movimientos el valor de L_r es menor a 8.0 m y mayor a 24.0 m en el 26.3%. En la relación entre D_r / L_r (profundidad / longitud, de la superficie de ruptura) predominan los valores menores a 0.19, con una proporción de 45.8%.

En las variables que se refieren a la masa desplazada se tienen los siguientes valores: en el espesor de la masa desplazada - D_d (m) se encontró que la mayoría en un 44.4% de los procesos están entre 1.5 – 2.5 m, y en una proporción menor a la mitad de 18.8% entre 2.5 - 3.5 m, y mayores a 4.5 m son el 13.5% de los movimientos. En el ancho de la masa desplazada - W_d (m) un alto porcentaje de los procesos en el 40.7% son de valores menores a 16.0 m, y entre 16.0 – 30.0 m constituyen un 23.7%, entonces aproximadamente el 65% de los movimientos tienen anchos menores a 30.0 m. En la longitud de la masa desplazada - L_d (m) se encuentra que cerca del 65% son menores a 12.0 m, distribuidos así, 41.4% se encuentra entre 6.0 – 12.0 m, y el 23.3% son menores a 6.0 m, y de los procesos restantes el 18.8% son mayores a 24.0 m.

En la longitud total (L) valores menores a 9.2 m predominan con un 33.8% de los procesos, seguido de longitudes entre 9.2 – 14.9 m en un 23.5%, aproximadamente el 57.3% de los procesos tienen longitud menor a 14.9 m y de los restantes el 23,5% corresponden a valores mayores a 26.0 m. El área total de la mayoría de los procesos en un 73.4% es menor a 500 m², seguido de procesos con áreas mayores 2000 m² en un 10.1%. Los valores del volumen involucrado en una alta proporción son inferiores a 506 m³, en el 73.8% de los procesos, luego están los procesos con volúmenes mayores a 2,006 m³, en una proporción mucho menor del 11.5%.

Comparación de variables contra cobertura vegetal

Para esta comparación se describe una a una cada variable contra los valores de la cobertura vegetal.

Estado: la mayoría de los procesos latentes e inactivos se encuentran en lugares con cobertura de matorrales, en todos los tipos de cobertura predomina ampliamente el estado activo.

Estilo: los procesos únicos en lugares sin cobertura predominan, también en ausencia de cobertura se presentan la mayoría de los procesos múltiples, los procesos compuestos y complejos se encuentran sólo en lugares con vegetación herbácea.

Distribución: la gran mayoría corresponden a procesos de tipo retrogresivo y ensanchando, y en lugares sin cobertura. En sitios donde se presentan construcciones sólo hay movimientos confinados, en presencia de cultivos y matorrales predominó el tipo ensanchando. Los procesos de tipo móviles están principalmente en combinación con vegetación herbácea.

Litología: el material coluvial predomina y está principalmente en ausencia de cobertura, y en menor proporción está la roca, en el caso de cobertura de matorrales y vegetación herbácea predomina el material residual.

Primer tipo de movimiento: en todas las coberturas predominan los flujos, excepto en los cuerpos con agua donde es la reptación. Los procesos traslacionales están presentes cuando no hay cobertura, y los rotacionales sólo en combinación con áreas de cobertura de matorrales.

Geología: los procesos se presentaron principalmente en depósitos coluviales (Qc) generalmente en sectores no cubiertos, gran parte de los procesos se presentaron en la Formación Bogotá (Tib) con vegetación herbácea.

Geomorfología: se encontraron procesos en el modelo estructural denudacional de cordillera sólo en lugares sin cobertura. En los procesos presentes en vegetación herbácea predomina el modelado Denudacional - Coluvial de piedemonte (DPmdc). En los procesos en las demás coberturas la principal geoforma es el modelado Denudacional - Coluvial de cordillera (DCmdc).

Factores condicionantes: el condicionante principal es el material plástico débil, presente en su mayoría en ausencia de cobertura seguido de la cobertura de vegetación herbácea y los matorrales, en cambio este tipo de material no está presente donde hay construcciones, cuerpos de agua y cultivos.

Factores detonantes: predomina la socavación en pata talud por una corriente y las lluvias, en todos los tipos de cobertura. La socavación de las márgenes de los ríos sólo se presentó en presencia de matorrales, así como disposición deficiente de estériles de escombros. El mantenimiento deficiente sistema de drenaje, escape de agua de tuberías y minería sólo se encuentran en ausencia de cobertura.

Diferencia de altura corona a punta (m): predominan los procesos con diferencia de altura menor a 13.0 m y en ausencia de cobertura, en presencia de

construcciones sólo hay valores mayores a 24.0 m, en cambio en los cultivos sólo menores a 7.5 m.

Longitud horizontal corona a punta (m): la mayoría de los procesos presentan valores menores a 8.0 m en zonas sin cobertura, este valor de longitud es el principal en la cobertura de matorrales y en cultivos es el único. En las coberturas de vegetación herbácea y construcciones predominan los valores mayores a 25 m.

Fahrböschung (°): la mayor parte de los procesos ocurren en lugares con ausencia de cobertura presentan valores de fahrböschung entre 33° y 55°, los valores menores a 22° sólo se presentan en los matorrales y la vegetación herbácea, en los matorrales la mayoría tienen valores entre 33.0° y 44.0°, únicos valores presente en las construcciones y los cultivos, en cambio en la vegetación herbácea sobresalen los procesos entre 22 – 32.99 grados.

Pendiente de ladera en pre-falla (°): predominan proceso con pendientes entre 48° – 60° seguidas por valores de 36° - 48°, de los cuales la gran mayoría de los datos corresponden a zonas sin cobertura. Y en todos los tipos de cobertura gran parte de los valores oscilan entre 24 – 36 grados.

Profundidad de la superficie de ruptura - Dr (m): En todos los tipos de cobertura y sin cobertura, los valores de Dr generalmente son menores 2.1 m, excepto donde se encuentran construcciones predominan valores entre 3.7 – 5.3 m.

Ancho de la superficie de ruptura (Wr): la gran mayoría de los procesos se presentan en zonas donde no hay cobertura con anchos menores a 29.0 m, en áreas de construcciones sólo se presentaron anchos menores a 15 m, y en cobertura de cultivos sólo en el intervalo de 29.0 – 44.0 m.

Longitud de la superficie de ruptura - Lr (m): valores entre 5.0 y 8.0 m dominan en las coberturas de matorrales, cultivos y zonas sin cobertura donde valores menores a 6.0 m son también importantes, en áreas con vegetación herbácea predominan también valores mayores a 14.0 m, el cual también es el único intervalo en que se presentan datos en lugares con construcciones.

Espesor de la masa desplazada - Dd (m): de los procesos sin cobertura y una altísima proporción son de espesor entre 1.5 – 2.5 m, los valores en este intervalo predominan en casi todas las coberturas menos en la vegetación herbácea donde se presentan más procesos en el intervalo de 2.5 – 3.5 m, y menores en el intervalo con la mayoría de procesos que en los matorrales.

Ancho de la masa desplazada - Wd (m): la combinación que más se presenta es de procesos en lugares sin cobertura con anchos menores a 30.0 m, también se observa que en lugares con construcciones solo se presentaron anchos menores

a 16 m, en cuerpos de agua solo se presentan anchos de entre 16 – 30.0 m, y en cultivos sólo en el intervalo de 30 – 44.0 m.

Longitud de la masa desplazada - Ld (m): longitudes entre 6 y 12 m predominan en las coberturas de matorrales, cultivos en donde es el único valor, y zonas sin cobertura combinación que corresponde a la mayor cantidad de datos. En las coberturas de vegetación herbácea y construcciones la mayoría de los valores exceden los 24 m.

Longitud total (L): se encontró que longitudes menores a 9.2 m predominan en las coberturas de matorrales y en ausencia de cobertura en la cual le siguen los valores entre 9.2 – 14.9 m. En la cobertura de vegetación herbácea la mayoría de los valores son sobrepasan 26.3 m, y, en construcciones y cuerpos de agua todos los datos exceden este valor.

Área total: en zonas con construcciones, cuerpos de agua y cultivos las áreas de los procesos en su totalidad corresponden a áreas inferiores a 500 m², procesos de áreas mayores a 2000 m² se presentan en su mayoría en zonas de matorrales y vegetación herbácea y de valores entre 1000 - 1500 m² sólo se observaron en presencia de vegetación herbácea o en ausencia de cobertura.

Volumen total: la mayoría de procesos de volumen mayor a 2006 m³ se presentaron en zonas con vegetación herbácea. Con excepción de las zonas con construcciones donde sólo hay volúmenes mayores a 2006 m³, en las demás coberturas predominan procesos de volúmenes inferiores a 506 m³.

Comparación de variables contra geología

Estado: en todas las unidades predominan los procesos en estado activo, los procesos que se encuentran en estado latente están en tres unidades que son Qc, Tib y Ksgd, y el inactivo solo en la unidad Qc.

Estilo: sólo en la unidad Ksgl no predominan los procesos únicos, sino los múltiples, y una alta proporción de los procesos están en combinación con la unidad Qc. Procesos complejos sólo se presentaron en la unidad Qc.

Distribución: la mayoría de los procesos de tipo retrogresivo se encuentran en la unidad Qc, en las unidades TKg, Qrt, y Tib predomina el tipo ensanchando y en las demás el retrogresivo.

Litología: en unidad Qc se presentan todos los tipos de litología, pero predominan los proceso en el material coluvial, en la unidades Tib y Ksch hay más

movimientos en material residual, en las unidades Tkg y Qrt son principalmente en material aluvial, y en la unidad Ksgl sólo hay procesos en roca.

Primer tipo de movimiento: en todas las unidades el flujo es el movimiento que más se presentó, con mayor frecuencia en la unidad Qc, por ser la unidad que predomina. Los movimientos rotacionales sólo se presentaron en la unidad Qc, los procesos de reptación se generaron sólo en las unidades Qc y Tkg.

Segundo evento: los flujos se presentaron en las unidades Qc y Ksgl, y las caídas en las unidades Qc y Tic.

Geomorfología: en la unidad Qc predomina la geoforma DCmdc, también en esta DPmdc y en mucha menor proporción DPme, la unidad Tib presenta sólo la geoforma DPmdc, la unidad Tic sólo presenta la geoforma DPme, la unidad TKg presenta las geoformas DPmdc y DCme, en la unidad Qrt sólo está la geoforma DPma, en la unidad Ksgd solo la geoforma DCmed, en la unidad Ksch encontramos las geoformas DCmdc y DCme, y en la unidad Ksgl sólo la geoforma DCme.

La geoforma DPmdc está en una gran extensión en la unidad Qc y un poco en la Ksch, la geoforma DPmdc se divide en tres unidades que son Qc, Tib y TKg. La geoforma DCmed está presente sólo en la unidad Ksgd, y la geoforma DPma está sólo en la unidad Qrt. La geoforma DCme está presente en tres unidades, TKg, Ksch y Ksgl, y la geoforma DPme esta en la unidades Qc y Tic.

Factores condicionantes: en las unidades Qc y Tib predominó como condicionante de los procesos el material plástico débil, el material meteorizado como factor condicionante de un movimiento se presentó en su mayoría en la unidad Qc. En la unidad TKg el principal factor condicionante de los procesos es el contraste de permeabilidades de los materiales, en la unidad Qrt son las lluvias, en la unidad Ksch es el material meteorizado, en la unidad Ksgl el único condicionante fue el material figurado.

Factores detonantes: en la unidad Qc se presentan casi todos los procesos donde el factor detonante fue la socavación de la pata del talud por una corriente. En las unidades Tib, TKg y Ksgd el principal detonante fueron las lluvias, en las demás es socavación de la pata del talud.

Uso del suelo: los procesos en la unidad Tic son los únicos en los que principal uso no es de área protegida, sino vivienda. Proceso en zonas de minería sólo hay en la unidad Ksgd y ganadería únicamente esta en la unidad TKg, en las vías en las unidades Qc y Tic al igual que las viviendas.

Diferencia de altura corona a punta (m): un en altísimo porcentaje los procesos ocurren en la unidad Qc y tienen valores menores a 13.0 m en diferencia de altura

corona a punta, seguidos de los presentes en la unidad Tic con valores mayores a 24.0 m . En la unidad Qrt sólo hay procesos con distancias menores a 7.5 m y en la unidad Ksgl entre 13.0 – 18.5 m.

Longitud horizontal corona a punta (m): en casi todas las unidades predominan procesos con longitudes menores a 13.0 m, pero en dos la Tib y Ksch predominan movimientos de longitudes mayores a 25.0 m.

Fahrböschung (°): proceso con valores de 33° a 44° se presentaron generalmente y en su mayoría en la unidad Qc. En las unidades TKg y Ksgl hay más procesos entre 44° - 54.99°, y sólo en la unidad Tib predominan los procesos con valores de fahrböschung entre 22° -33°.

Pendiente de ladera en post-falla (°): aunque los procesos en el intervalo de 38 a 50 grados fueron los más comunes, sólo predominan en dos unidades geológicas Qc y Ksch. La mayoría de los procesos ocurren en la unidad Qc y tienen pendientes post-falla entre 38° y 62°. Por otro lado la unidad Tib es la única en la que hay principalmente movimientos con pendiente post-falla entre 26° – 38°.

Pendiente de ladera en pre-falla (°): una altísima cantidad de los procesos se encuentran en la unidad Qc con valores de pendiente pre-falla entre 24° y 60°. La unidad Tib y ksch son las únicas donde se presentan procesos en los que predominan valores entre 24° - 35.99° y entre 36° – 47.99° de pendiente pre-falla respectivamente, por otro lado en los procesos de la unidad Ksgl sólo hay pendientes mayores a 60°.

Profundidad de la superficie de ruptura - Dr (m): en todas la unidades predominan los procesos con profundidades menores a 2.1 m, excepto en la unidad Ksgl en donde solo hay procesos con profundidades entre 3.7 y 5.3 m, un porcentaje alto de los procesos ocurren en la unidad Qc con profundidades inferiores 2.1 m.

Ancho de la superficie de ruptura (Wr): gran parte de los procesos ocurren en unidad Qc y presentan anchos menores a 29.0 m, en la mayoría de las unidades geológicas se presentan movimientos con ancho de la superficie de ruptura menor a 15.0 m, pero en la unidades Tib y TKg predominan los procesos con valores de ancho entre de 29.0 – 43.0 m y 43.0 – 57.0 m respectivamente, en las unidades Tic y Ksgl sólo hay procesos mayores a 57.0 m.

Longitud de la superficie de ruptura - Lr (m): En las unidades Qc y Qrt predominan los procesos de longitud menor a 8.0 m, pero en las unidades Tib y Ksch son mayoría los procesos que exceden los 14.0 m de longitud de superficie de falla. En cambio en las unidades TKg y Ksgl son más los movimientos con valores de Lr entre 8.0 – 11.0 m.

Relación entre Dr / Lr (profundidad / longitud, de la superficie de ruptura): excepto dos unidades Qrt y Ksgl, procesos con valores Dr/Lr menores a 0.19 son los que más se presentan, en las unidades Qrt y Ksgl en la mayoría de los procesos tiene valores de Dr/Lr entre 0.19 - 0.38 y 0.38 - 0.57, respectivamente.

Espesor de la masa desplazada - Dd (m): la mayoría de los procesos tienen espesores entre 1.5 - 2.5 m y ocurren en la unidad Qc. Sólo en la unidad Tib predominan procesos con valores entre 2.5 - 3.5 m, y en la unidad KSGl mayores a 4.5 m.

Ancho de la masa desplazada - Wd (m): procesos con ancho de la masa desplazada menor a 16 m predominan en las unidades Qc, Qrt, ksgd y Ksch, pero en la unidad Tib hay mayor cantidad de procesos en el intervalo de 30 – 44 m y en la unidad TKg en el intervalo de 44 -57.99 m, en las unidades Tic y Ksgl sólo hay procesos mayores a 58.0 m de ancho de la masa desplazada. De los procesos con ancho entre 16.0 – 23.0 m casi todos son en la unidad Qc.

Longitud de la masa desplazada - Ld (m): Sólo en las unidades Tib y Ksgl predominan procesos con valores mayores a 24.0 m, En las demás unidades la mayoría de los procesos son menores a 6.0 m, y una alta proporción ocurren en la unidad Qc.

Longitud total (L): de igual manera la mayoría de los procesos pertenecen a la unidad Qc y tienen longitud menor a 15.0 m, Pero en las unidades Tib y Ksch predominan los procesos de longitud total mayores a 26.3 m.

Área: sólo en dos unidades Ksgl y Ksch dominan los procesos entre 1000 – 1500 m², en la mayoría de las unidades ocurrieron procesos de áreas menores a 500 m², y una alta proporción de estos corresponden a la unidad geológica Qc.

Volumen: sólo en las unidades Tib y Ksgl no predominan procesos con volúmenes menores a 506 m³, sino mayores a 2006 m³, la proporción de procesos en unidad Qc de menos de 506 m³ es bastante alta, y abarca casi la totalidad de los datos.

Comparación de variables contra geomorfología

Estado: los procesos activos predominan en todas geoformas, los procesos en estado latente están únicamente en las geoformas DCmdc, DPmdc y DCmed, y los inactivos exclusivamente en DCmdc.

Estilo: todos los procesos presentes en la geoforma DCmdc son de estilo único y corresponden a la mayoría de los movimientos inventariados, junto con los de este

estilo en geoforma DPmdc, también allí se presentan todos los procesos compuestos, y la mayoría de los múltiples.

Distribución: en la geoforma DCmdc predomina los procesos retrogresivos, en cambio en el DPmdc los procesos de distribución de tipo ensanchando, estas dos combinaciones reúnen la mayoría de los movimientos.

La litología: en las geoformas DCmdc y DPmdc predominan los procesos en material coluvial constituyen la mayoría de los movimientos, de los procesos en la geoforma DPma ocurren principalmente en material aluvial, y en DCme y DPme en cambio es en roca donde se generan más procesos.

Primer tipo de movimiento: en todas las geoformas el movimiento de mayor ocurrencia es el flujo, los procesos rotacionales solamente están presentes en la geoforma DCmdc, la mayoría de procesos de caída ocurren en la geoforma DPmdc y los procesos de reptación sólo se presentan en DPmdc y DCmdc.

Segundo evento: en los casos en que se presentó un segundo movimiento los de tipo flujo sólo se generaron en las geoformas DPmdc y DCmed, y los de tipo caída en la geoforma DPmdc.

Factores detonantes: de los procesos en que el factor detonante es la socavación en la pata del talud por una corriente, en su mayoría se presentan en la geoforma DCmdc, en cambio en la geoforma DPmdc se encuentran casi todos los procesos detonados por lluvia.

Uso del suelo: todos los procesos en zonas de vivienda, vías y ganadería se presentan en la geoforma DPmdc, y en las zonas de minería en DCmed.

Diferencia de altura corona a punta (m): un alto porcentaje de los procesos con longitudes mayores a 7.5 m se presentan en la geoforma DPmdc, y de los menores a 7.5 m en la geoforma DCmdc,

Longitud horizontal corona a punta (m): la mayoría de los procesos encontrados con longitud horizontal corona a punta menor a 13.5 m están en la geoforma DCmdc, caso contrario en la geoforma DPmdc se ocurren la mayoría de los procesos con valores mayores a 25.0 m.

Fahrböschung (°): en la geoforma DCmdc predomina los procesos con valores entre 33° y 55°, y en la geoforma DPmdc con valores de fahrböschung entre 22° y 33°.

Pendiente de ladera en pre-falla (°): en la geoforma DCmdc predominan los procesos con pendientes entre 48° - 60°, y en la geoforma DPmdc con pendientes entre 24° y 48°.

Ancho de la superficie de ruptura - W_r (m): un alto porcentaje de los procesos menores a 29.0 m se presentaron en la geoforma DCmdc, en caso contrario la mayoría de los movimientos con valores mayores a 32.0 m están en la geoforma DPmdc.

Espesor de la masa desplazada - D_d (m): gran parte de los procesos que se encuentran en la geoforma DCmdc tienen espesores entre 1.5 -2-5 m, movimientos con espesores entre 2.5 y 3.5 m y menores a 1.5 m son más frecuentes en la geoforma DPmdc.

Ancho de la masa desplazada - W_d (m): la mayoría de los procesos con anchos menores a 30 m se presentaron en la geoforma DCmdc, en cambio gran parte de los movimientos con valores mayores a 30.0 m se originaron en la geoforma DPmdc.

Longitud de la masa desplazada - L_d (m): los movimientos de longitud menor a 12.0 m con frecuencia se generaron en la geoforma DCmdc y casi la totalidad de los procesos de longitudes mayores a 24.0 m se presentaron en la geoforma DPmdc.

Longitud total (L): la mayor parte de los movimientos con longitud mayor a 26.3 m se presentaron en la geoforma DPmdc, en cambio un alto porcentaje de los procesos menores 14.9 m en la geoforma DCmdc.

Área: en la geoforma DCmdc sólo se presentaron procesos con áreas menores a 1000 m² y casi en su totalidad son menores a 500 m², por el contrario la mayoría de los procesos de áreas con valores mayores a 1000 m² se presentaron en la geoforma DPmdc.

Volumen: los procesos presentes en la geoforma DCmdc en su mayoría poseen volúmenes menores a 506 m³, en cambio los procesos de volúmenes mayores a 506 m³ ocurren en la geoforma DPmdc.

6.5.4 Exploración de campo

El programa de exploración geotécnica fue definido a partir del mapa de unidades geológicas superficiales, teniendo en cuenta la obtención de la información relevante, necesaria para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto.

De esta manera, dentro de la exploración geotécnica se consideró la ejecución de cinco líneas sísmicas, seis tomografías, diez sondeos mecánicos y la recuperación de muestras en bloque. Todo ello en los sitios y con las características que se detallan a continuación.

Líneas Sísmicas

La localización y extensión de las cinco líneas sísmicas definidas, aparece consignada en la Tabla 6-3. y se encuentran referenciadas en la Figura 6-12.

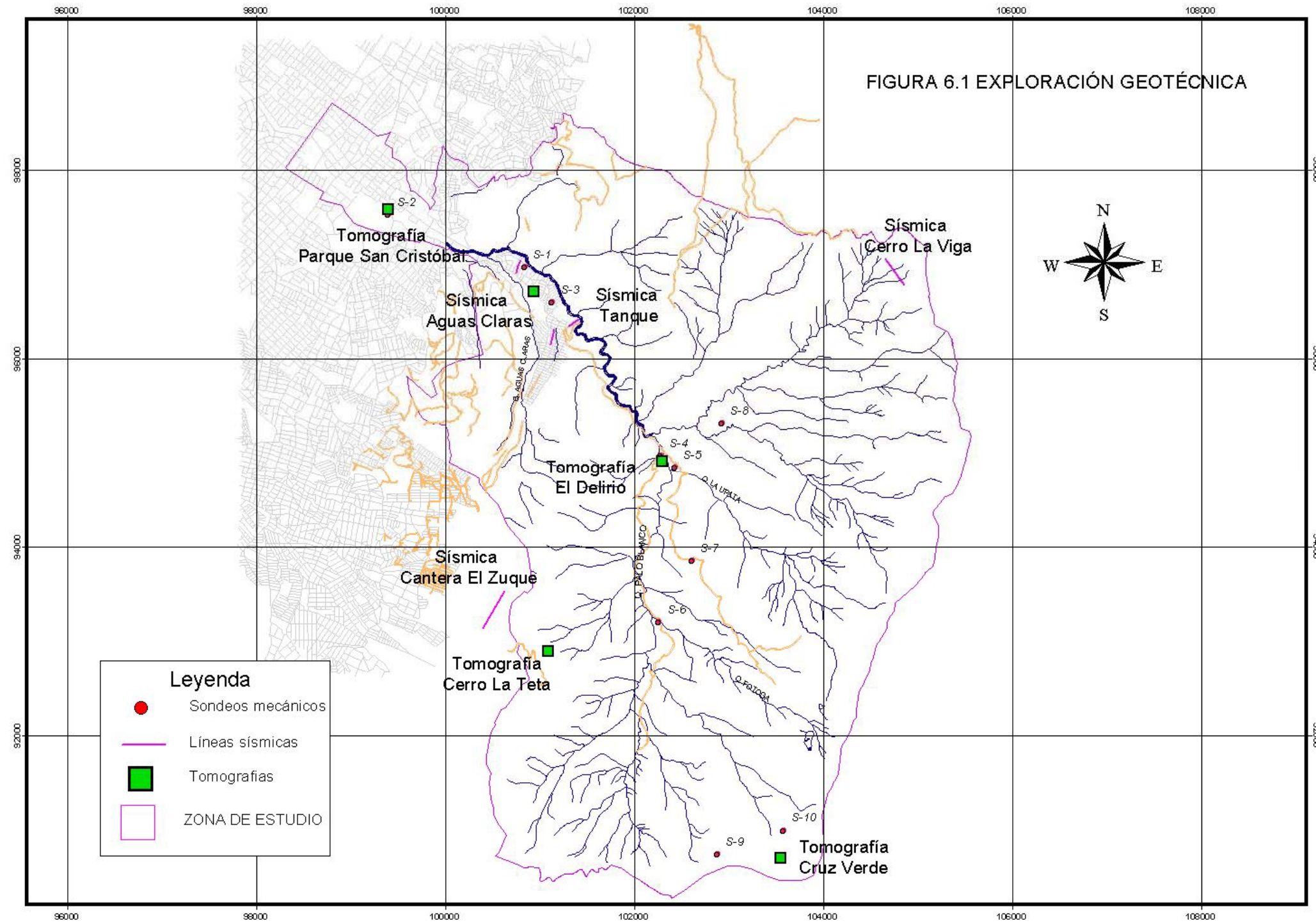


Figura 6-12. Exploración geotécnica.

Línea #	Sitio del Ensayo	Longitud de la línea
1	Aguas Claras 1	200 Metros
2	Aguas Claras 2	200 Metros
3	Tanque Vitelma	200 Metros
4	Cantera el Zuque	200 Metros
5	Cerro La Viga	200 Metros

Tabla 6-3. Localización de las líneas sísmicas

Los resultados obtenidos pueden ser consultados en el Anexo C -6

Tomografías eléctricas

Las tomografías realizadas tuvieron como objetivo, identificar los espesores de los depósitos de las unidades de suelo y la profundidad de la superficie de falla en las masas inestables.

Su localización aparece descrita en la Tabla 6-4. y se encuentra referenciada en la Figura 6-12.

Línea #	Sitio del Ensayo	Longitud de la línea
1	El Delirio	200 Metros
2	Parque San Cristóbal	200 Metros
3	Páramo Cruz Verde	200 Metros
4	Aguas Claras Laureles	200 Metros
5	Aguas Claras Parte Baja	200 Metros
6	Cerro La Teta	200 Metros

Tabla 6-4. Localización de los sitios donde se efectuaron tomografías eléctricas.

Los resultados obtenidos pueden ser consultados en el Anexo C - 6

Sondeos Mecánicos

Con el objetivo de obtener muestras inalteradas de cada una de las unidades de suelo presentes en el área de estudio, se realizaron 10 sondeos mecánicos en los sitios ya especificados en la Figura 6-12., obteniendo los registros de perforación que pueden ser consultados en el Anexo C -7. Las perforaciones a mayor profundidad no se pudieron ejecutar por no contar con la autorización de la CAR para ingresar equipos pesados en la cuenca.

Los Sondeos S-1 y S-3 se realizaron sobre el depósito coluvial de la zona periurbana, el Sondeo S-2 sobre el depósito aluvial de la parte baja de la zona de estudio, los Sondeos S-4 a S-9 se llevaron a cabo en el depósito coluvial de la parte media y alta de cuenca, y el Sondeo S-10 sobre el depósito morrénico.

En el depósito aluvial (Sondeo S-2) fue imposible superar el relleno antrópico superficial, debido a la presencia de bloques que impidieron la penetración de la tubería.

En el depósito coluvial de la zona periurbana (Sondeos S-1 y S-3) se logró llegar hasta profundidades que oscilaron entre 4.20 y 5.70 metros desde el nivel del terreno natural. Se recuperaron muestras inalteradas que permitieron realizar los ensayos de laboratorio a fin de determinar los parámetros de resistencia, deformabilidad, permeabilidad y comportamiento dinámico de los materiales presentes.

En el depósito coluvial de la parte media y alta de la cuenca, se realizaron seis sondeos (S-4 a S-9). En los sondeos S-4 a S-8 se logró muestrear el material existente hasta profundidades variables entre 3.50 y 6.20 metros. Por debajo de tales niveles se encontró bien la presencia de bloques que impidieron el avance de la perforación, o la presencia del lecho rocoso que subyace el depósito.

En el sondeo S-9 se encontró el macizo rocoso apenas a 1.20m por debajo de la superficie del terreno.

Finalmente, en el sondeo S-10 realizado sobre el depósito morrénico, se logró perforar hasta una profundidad de 2.70 m, obteniendo muestras inalteradas y un registro completo de la resistencia a la penetración, mediante el ensayo SPT.

Caracterización Geotécnica

En relación con la caracterización geotécnica, la zona de estudio puede ser dividida en tres tipos de unidades superficiales:

1. Depósitos de suelos transportados: Estos incluyen los depósitos coluviales (Qc), los depósitos de la Formación Chisacá (Qrc) y el depósito aluvio torrencial (Qrt). (Ver Mapa de Geología).
2. Suelos Residuales: Dentro de las unidades superficiales definidas como suelos residuales se encuentran los depósitos formados por meteorización de rocas, yacientes sobre las siguientes unidades geológicas: Formación Bogota (Tib), Formación Guaduas (Tkg) y Formación Chipaque (Ksch).
3. Unidades de Roca: En este tipo de unidad superficial se ubican las unidades geológicas que dadas sus características físicas, no favorecen la formación de suelos residuales y se muestran prácticamente aflorando en superficie, a saber: Formación Cacho (Tic), Formación arenisca tierna (Ksgt), Formación arenisca de labor (Ksgl), Formación Plaeners (Ksgp) y Formación Arenisca Dura (Ksgd).

La caracterización geotécnica de las unidades de suelos transportados y en parte de las unidades de suelo residual, está basada en la exploración geotécnica, mientras que la misma para las unidades de roca, fue realizada principalmente mediante información secundaria.

Al respecto, vale la pena mencionar que dentro del trabajo de campo, en especial dentro del inventario de procesos morfodinámicos, tan sólo se localizaron 9 procesos, equivalentes al 6.5 %, sobre unidades de roca, mientras que el 60 % de los procesos se localizaron sobre unidades de suelo transportado, razón por la cual se dio prioridad a la exploración geotécnica en estos últimos.

Por otra parte y argumentando la decisión de focalizar la exploración sobre los depósitos de suelo transportado, se debe considerar que éstos son los que potencialmente aportarían la mayor cantidad de sedimentos al cauce, no sólo por sus propiedades de resistencia (menores a las de las unidades de roca), sino también por su mayor cercanía al cauce principal.

A continuación se presentan los perfiles típicos de las unidades de suelo transportado, junto con los valores de los parámetros geotécnicos, producto de la consolidación de la información obtenida dentro del programa de exploración y la

ejecución de los ensayos de laboratorio y campo cuyos resultados pueden ser consultados en el Anexo C -8.

Análisis e Investigación de Procesos de Avenidas Torrenciales como Eventos Generadores de Riesgo en la Cuenca Alta del Río San Cristóbal								
PERFIL GEOTÉCNICO PROMEDIO								
Depósito Coluvial parte Baja (Qc)								
Descripción	Profundidad	H (g/cm^3)	Gs	C' (kg/cm2)	H (Grados)	Relación de vacíos	Porosidad	Kv (m/hora)
<p style="text-align: center;">----- N.F = 2,05 m.</p> <p>Depósito coluvial compuesto por gravas en una matriz areno limosa o areno arcillosa, con esporádica presencia de bloques y existencia de materia orgánica en descomposición. Los porcentajes de finos alcanzan el 32 %, siendo característicos límites líquidos del orden de 35 y límites plásticos del orden de 22 %. Las humedades naturales oscilan entre 12 y 25 %</p>	<p>El estrato muestra espesores variables entre 1,90 m en la parte superior de las laderas y hasta de 12,0 m en la parte baja cerca del río</p>	1.94 - 2.05	2.61	0.065 - 0.20	28.3 - 29.9	0.86	0.462	3.082E-06
<p>Arena limo arcillosa (SM) o arcillo limosa (SC) producto de la meteorización de un estrato de limolita o arenisca de grano fino - medio, con porcentajes de finos hasta del 45 %, de color gris claro, de plasticidad baja y consistencia firme. El límite líquido de la fracción fina se encuentra entre 35 y 38 y el límite plástico alrededor de 22. Las humedades naturales oscilan entre 11 y 25%.</p>	<p>En la parte superior de las laderas aparece desde 1,90 m por debajo del terreno natural, mientras que en las partes bajas, cerca del cauce principal, aparece a profundidades superiores a 12,0 m. El espesor de este suelo residual varía entre 0,40 m y 1,70 m.</p>	1.93	2.67	0.415	33	0.64	0.390	8.904E-06
<p>Roca de la Formación Guaduas (TKg - Tic)</p>	<p>En la parte superior de las laderas y bajo el lecho del río, aparece a profundidades inferiores a 2,50 m por debajo de la superficie, mientras que en la ladera media - inferior aparece a profundidades hasta de 12.0 m</p>							

**Análisis e Investigación de Procesos de Avenidas Torrenciales como Eventos
Generadores de Riesgo en la Cuenca Alta del Río San Cristóbal**

PERFIL GEOTÉCNICO PROMEDIO

Depósito Coluvial parte media - Margen Izquierda (Qc)

Descripción	Profundidad	γ_t (g/cm^3)	Gs	C' (kg/cm ²)	ϕ' (Grados)	Relación de vacíos	Porosidad	Kv (m/hora)
Limo orgánico de color negro con vetas de oxidación y con presencia de raicillas, humedad natural media a alta	0.00 - 1.00							
Arena limo arcillosa (SM) o arcillo limosa (SC), con porcentajes de finos hasta del 34 %, de color gris - habano, de plasticidad baja y consistencia firme. El límite líquido es del orden de 45 y el límite plástico de 30, Las humedades naturales tienen valores entre 28 y 32 %.	1.00 - 3.60	1.87 - 1.89	2.58	0.257 - 0.396	23.1 - 24.3	1.58	0.61	1.85E-05
Arcilla limosa de color gris, de plasticidad baja y consistencia firme	Desde 3,60 m y hasta profundidades variables entre 4,30 m y 6.20m por debajo del nivel del terreno				23 (SPT)			
Roca de la Unidad Geológica Ksch	En la parte inferior de las laderas, aparece a profundidades variables entre 4.30 y 6.20 m. En las partes altas aparece a profundidades inferiores a 1.0 metro.							

**Análisis e Investigación de Procesos de Avenidas Torrenciales como Eventos
Generadores de Riesgo en la Cuenca Alta del Río San Cristóbal**

PERFIL GEOTÉCNICO PROMEDIO

Depósito Coluvial parte media - Margen Derecha (Qc)

Descripción	Profundidad	γ (g/cm^3)	Gs	C' (kg/cm ²)	ϕ (Grados)	Relación de vacíos	Porosidad
Limo orgánico de color café - negro con trazas de oxidación y abundantes raicillas, humedad natural media, plasticidad media y consistencia blanda	Desde la usperficie hasta profundidades variables entre 0.20 m y 1.30 m						
<p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;"><u>N.F = Profundidades entre 1.60 y 2.30 m</u></p> <p>Arcilla limosa (CL) con presencia en un porcentaje apreciable de arenas (hasta el 34%) y de gravas (hasta del 10 %), de color gris - habano, con abundantes trazas de oxidación, de plasticidad media - baja. Los límites líquidos oscilan entre 23 y 59 %, los límites plásticos entre 15 y 30 % y las humedades naturales toman valores entre 11 y 27 %.</p>	El estrato se extiende hasta profundidades variables entre 3.30 m y 5.80 m, siendo mas espeso en la parte baja de las laderas	Entre 1.86 y 2.11 siendo característicos los valores cercanos a 1.95	Entre 2.57 y 2.71, con un valor medio de 2.60	Entre 0.00. y 0.53 con un valor medio de 0.22	Entre 19.4. y 35.4 con un valor medio de 28.0	Entre 0.63 y 1.28	0.56
Rocas pertenecientes a la Unidad Ksgd: Arenisca Dura	Aparece a profundidades variables entre 3.30 m y 5.80 en la parte media - baja de las laderas, pero puede estar más superficial hacia la parte alta de la cuenca.						

Análisis e Investigación de Procesos de Avenidas Torrenciales como Eventos Generadores de Riesgo en la Cuenca Alta del Río San Cristóbal

PERFIL GEOTÉCNICO PROMEDIO

Depósito Morrénico (Qrc)

Descripción	Profundidad	δt (g/cm ³)	Gs	C' (kg/cm ²)	δ' (Grados)	Relación de vacíos	Porosidad	Kv (m/hora)
Limo orgánico de color negro, con abundantes raicillas, de humedad natural alta	Entre 0.0 m y hasta profundidades variables entre 0.40 m y 0.80 m							
Arena grava limosa formando un paquete de color gris verdoso (SM). Los porcentajes de arena se encuentran cercanos al 60 % y los de gravas oscilan entre 20 y 30 %. El contenido de finos es bajo y de composición predominantemente limosa. Las humedades naturales muestran valores entre 12 y 15 %. N.F = 1.90 m.	De acuerdo con la tomografía eléctrica, los espesores del depósito están entre 5 y 15 metros	1.93 - 2.20	2.62 - 2.74	0.0 - 0.46	20.8 - 38.2	0.85	0.46	0.00036
Rocas del Grupo Guadalupe: Arenisca de grano fino a medio, de color habano altamente oxidada y meteorizada	La Tomografía eléctrica concluye que el lecho rocoso aparece a profundidades variables entre 5 y 15 metros							

Como se mencionó, la caracterización geotécnica de las unidades superficiales de suelo residual y de roca fue elaborada a partir de los resultados de medición de las velocidades de onda en algunos sitios y complementada mediante información secundaria, por lo que en la Tabla 6-5 se presentan los parámetros geotécnicos estimados y en Tabla 6-6 las referencias bibliográficas que sirvieron como fuente de información.

Unidad	γ (KN/m ³)	C' (KN/m ²)	ϕ ' (Grados)	Porosidad (%)	Kv (m/hora)
Formación Tilatá (TQt)	19.7	24	32	56 ⁽¹⁾	1.67*10E-3 ⁽¹⁾
Formación Bogotá (Tib)	19.4 ⁽⁴⁾	92.12 ⁽⁴⁾	32 ⁽⁴⁾	15 ⁽¹⁾	3.6*10E-6 ⁽¹⁾
Formación Cacho (Tic)	20.09	20	24	16 ⁽¹⁾	3.6*10E-3 ⁽¹⁾
Formación Guaduas (TKg)	20.77 ⁽³⁾	78.4 ⁽³⁾	36 ⁽³⁾	15 ⁽¹⁾	3.6*10E-6 ⁽¹⁾
Formación Arenisca Tierna (Ksgt)	-	-	33 ^(2, 5, 8)	16 ⁽¹⁾	3.6*10E-3 ⁽¹⁾
Formación Arenisca de Labor (Ksgl)	-	-	35 ^(5, 8)	16 ⁽¹⁾	3.6*10E-3 ⁽¹⁾
Formación Plaeners (Ksgp)	-	-	34 ^(6, 7)	16 ⁽¹⁾	3.6*10E-3 ⁽¹⁾
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	-	-	35 ^(5, 8)	16 ⁽¹⁾	3.6*10E-4 ⁽¹⁾
Formación Chipaque (Ksch)	19.8	90.16	25.4	15 ⁽¹⁾	3.6*10E-6 ⁽¹⁾

Tabla 6-5. Parámetros estimados para las unidades de suelo residual y roca.

Referencia #	Referencia
1	Luís I. González de Vallejo., Ingeniería Geológica, Prentice Hall., España, 2002
2	ROCAS Y MINERALES (1999) Estudio Geotécnico, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras Recomendadas para estabilizar el Antiguo Escarpe de Explotación frente al Barrio El Mirador.
3	FOPAE – CIVILES LTDA. - HIDROCONSULTA LTDA., Estudio de la ladera occidental del barrio Laureles, medidas correctivas y de mitigación para estabilizar la zona de estudio.
4	Unión Temporal Riesgos Urbanos (2003) Estudio de riesgo por Remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del Barrio San Isidro sectores Cerrito I, II, III y Carboneras de la Localidad de Ciudad Bolívar en la ciudad de Bogotá D.C.
5	INGEOCIM Ltda. Ingenieros Consultores – UPES FOPAE (1998) Informe Geotécnico y caracterización de materiales – Zonificación de riesgos por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafe de Bogotá
6	INDESA Ltda. Ingeniería y Desarrollo Ambiental (2000) Estudio de Riesgos por Remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, Protección y Estabilización en el Barrio el Codito, Localidad de Usaquen.
7	Correa Alvaro de la Cruz (2002) Estudio de definición de Factores de Seguridad de taludes en la zona de suspensión minera de la Localidad Rafael Uribe Uribe. Universidad Nacional de Colombia.
8	Ramírez Valero, Héctor Alexander y Sánchez Rondón, Carlos Augusto (2000) Caracterización esfuerzo-deformación de tres tipos de roca de la Formación Guadalupe (Arenisca dura, Arenisca labor, Arenisca tierna) bajo condiciones de confinamiento. Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Pregrado.
9	INGEMETRICA Ltda. (1999) Zonificación de Amenazas y Riesgos por Remoción en Masa, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de las obras recomendadas para el Barrio Soratama.
10	German Darío Tapias Muñoz (2006) Estudio para evaluación geotécnica de obras del IED Aguas Claras.

Tabla 6-6. Referencias Bibliográficas de donde fue tomada la información de parámetros geotécnicos para las unidades de suelo residual y roca

6.6 Cobertura y uso del suelo

6.6.1 Interpretación de imágenes aplicada al uso y cobertura de la tierra

Descripción de las características básicas de la imagen y análisis de las estadísticas unibanda y multibanda.

Características:

Es una imagen SPOT 4, multiespectral con cuatro bandas, capturada el 24 de agosto de 2006; cuyo esferoide de referencia es el internacional 1909, Datum internacional de 1909 y tipo de proyección UTM.

Los datos del píxel son:

Tamaño del píxel 10x10 metros.

767 (filas) x 980 (columnas); aclarando que el tamaño de esta matriz es el que se obtuvo luego de cortar la imagen de la principal, de tal forma que la imagen que se obtiene es la que se muestra en la Figura 6-15:

El perímetro de la imagen que se recortó es de 33500m = 33.500km

El área de la imagen que se recortó es de 6964.36hect = 69.6436km²

El perímetro de la zona de estudio es de 30240.23m = 30.240km aproximadamente

El área de la zona de estudio es de 3666.2902hect = 36.6629km² aproximadamente

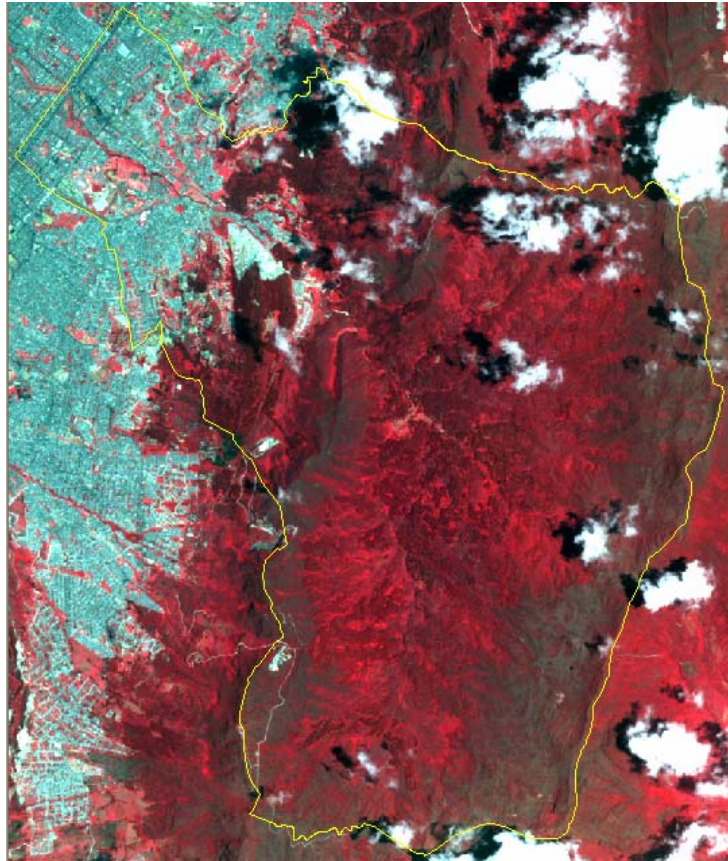


Figura 6-13. Imagen SPOT 4.

Estadísticas unibanda:

Desplegando la imagen solamente en una banda y sin ninguna clase de realce.

LAYER	BANDA (micras)	MEDIA	MODA	MEDIANA	DESV. STD.	ND Mín.	ND Máx.
1	VERDE (0,50 - 0,59)	112.428	97	107	29.549	37	255
2	ROJO (0,60 - 0,68)	98.354	66	79	44.722	45	255
3	I. R. C. (0,78 - 0,89)	103.691	79	85	40.656	53	255
4	I. R. M. (1,58 - 1,75)	78.374	64	74	26.915	24	255

Banda1:

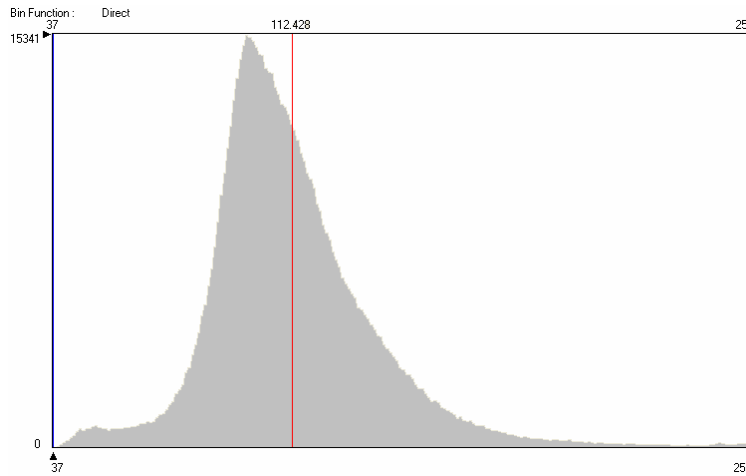


Figura 6-14. Histograma de la banda 1 sin aplicar.

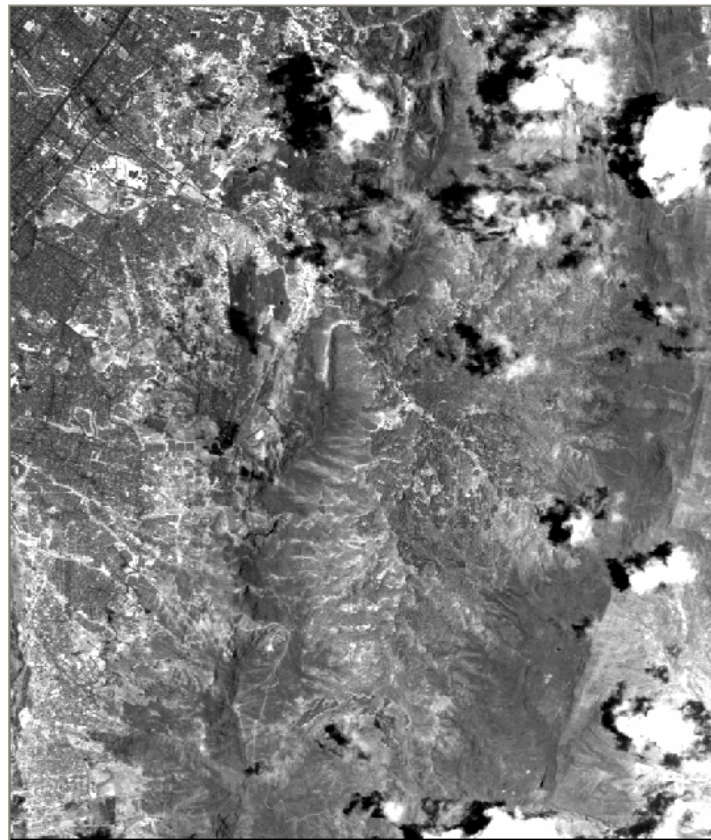


Figura 6-15. Imagen de la banda sin aplicar realce.

Banda 2:

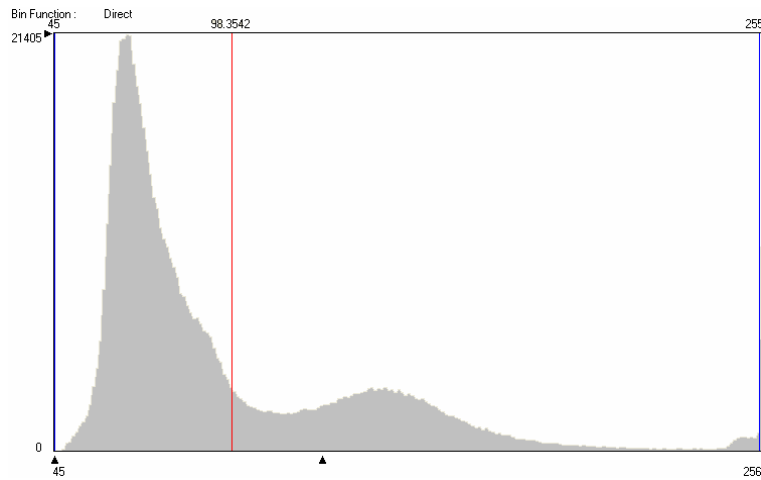


Figura 6-16. Histograma de la banda 2 sin aplicar.



Figura 6-17. Imagen de la banda sin aplicar realce

Banda 3:

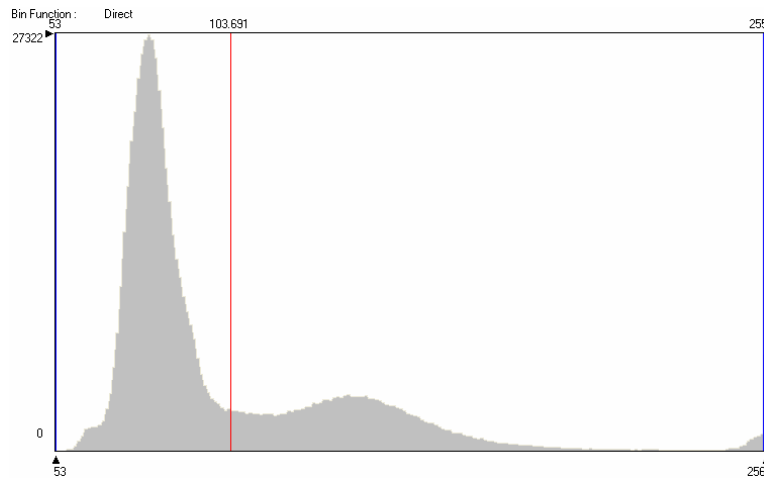


Figura 6-18. Histograma de la banda 3 sin aplicar.

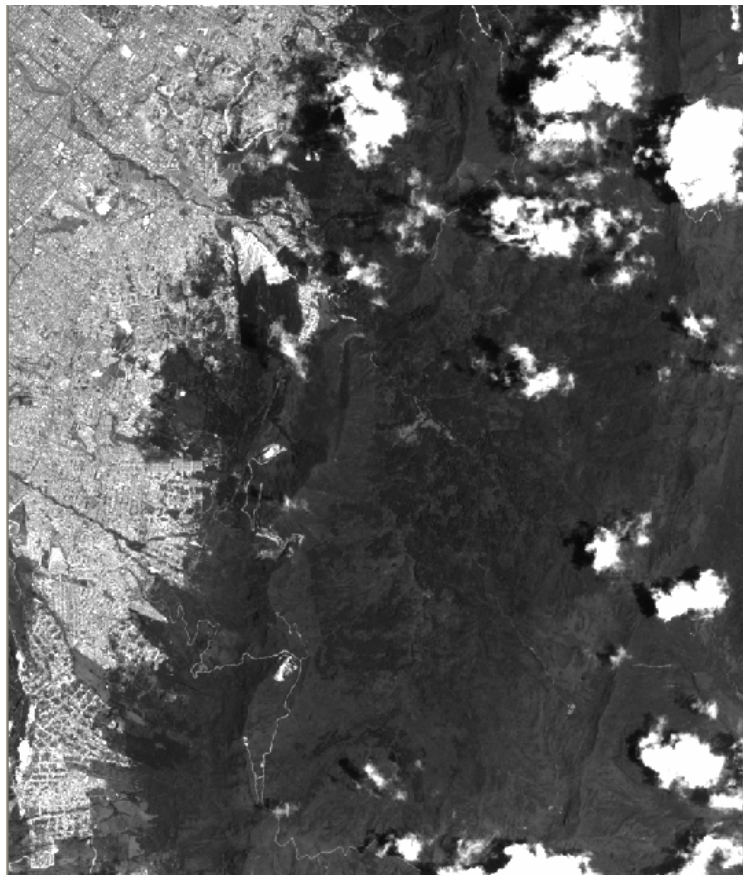


Figura 6-19. Imagen de la banda sin aplicar realce

Banda 4:

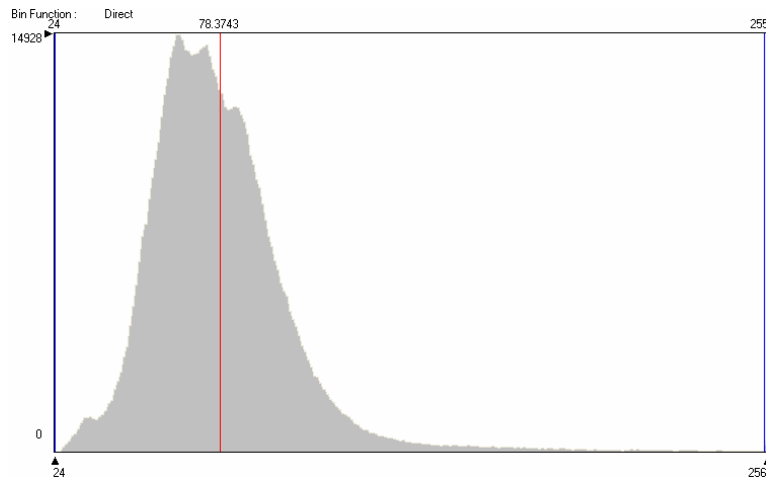


Figura 6-20. Histograma de la banda 4 sin aplicar.

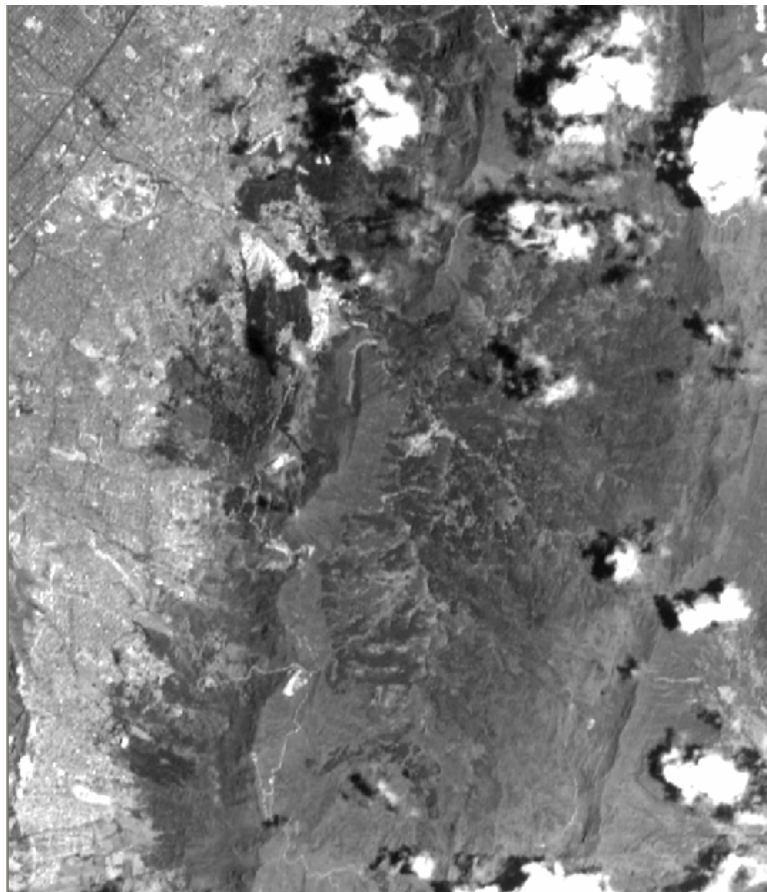


Figura 6-21. Imagen de la banda sin aplicar realce

Con estas estadísticas por cada banda se puede tener una apreciación inicial de los niveles digitales presentes en la imagen. El hecho de que el histograma este hacia el lado izquierdo de la media poblacional (media de los niveles digitales entre 0 y 255 suponiendo que la LUT, o, tabla de color marque que NivelVisual = NivelDigital, pues la resolución del monitor es igual a la resolución radiométrica de la imagen)¹ nos indica que la imagen es oscura, lo cual se puede ver en las imágenes de las bandas 2 y 3 sin aplicar ninguna clase de realce, mucho más marcado en la banda 2, igualmente esto se debe a que la media en la banda 3 es un poco mayor que en la banda 2; Al analizar el contraste de la imagen para cada banda mediante la diferencia del nivel digital máximo y mínimo, vemos la imagen oscura haciendo que la interpretación se dificulta de tal modo que el rango ($ND_{\max} - ND_{\min}$) es pequeño.

Para las imágenes con las bandas 1 y 4 los histogramas están más centrados que los mencionados, lo cual hace que las imágenes tenga un tono más claro (sin necesidad de hacerle realces) que las demás, vemos que los histograma tienden un poco mas a una normalización por lo tanto son un poco mas fácil de interpretar, y podemos observar que el rango ($ND_{\max} - ND_{\min}$) son los más grandes, lo que nos sugiere que el contraste es bueno; mas sin embargo la imagen de la banda 4 es más oscura la imagen de la banda 1, debido a que el contraste es más deficiente que en la primera.

En ninguna de las imágenes con una sola banda se presenta bandeamiento, por lo cual no hay que hacer las debidas correcciones.

Estadísticas multibanda:

Matriz de varianza – covarianza

Matemáticamente:

$$COV_{JK} = \frac{\sum_{i=1}^n (ND_{iJ} - \overline{ND}_J) * (ND_{iK} - \overline{ND}_K)}{n}$$

Con $n =$ Numero de pixels

$ND =$ Nivel digital

$J, K =$ Bandas \Rightarrow con cada uno de estos niveles de cov se obtiene la matriz:

1

$$\text{var-cov} = \begin{bmatrix} \text{var}_1 & \text{cov}_{21} & \dots & \text{cov}_{n1} \\ \text{cov}_{12} & \text{var}_2 & \dots & \text{cov}_{n2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \text{cov}_{1n} & \text{cov}_{2n} & \dots & \text{var}_n \end{bmatrix}$$

	B1	B2	B3	B4
B1	873.134	732.247	727.816	632.908
B2	732.247	2000.052	1801.115	1043.100
B3	727.816	1801.115	1652.892	954.069
B4	632.908	1043.100	954.069	724.435

Matriz Varianza -Covarianza

Esta matriz indica el error medio cuadrático (varianza) en cada banda (valores de la diagonal), y los demás valores son un indicativo del grado de relación que existe entre las diferentes bandas, ya que es la relación que existe entre el error de una banda con respecto a la otra.

Matriz de correlación

Matemáticamente:

$$\rho_{JK} = \frac{\text{COV}_{JK}}{\sigma_J * \sigma_K}; \text{ Cada valor de estos valores esta entre -1 y 1}$$

ρ = Índice de correlación

σ = Desviación estándar para las bandas J y K

cov = Covarianza entre las bandas J y K

⇒ Con cada uno de estos niveles de ρ se obtiene la matriz:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_{21} & \dots & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & \rho_2 & \dots & \rho_{n2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \rho_{1n} & \rho_{2n} & \dots & \rho_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ \rho_{12} & 1 & & \\ \cdot & \cdot & \dots & \\ \rho_{1n} & \rho_{21} & \dots & \rho_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} & B1 & B2 & B3 & B4 \\ B1 & 1 & 0.554 & 0.606 & 0.796 \\ B2 & 0.554 & 1 & 0.991 & 0.867 \\ B3 & 0.606 & 0.991 & 1 & 0.872 \\ B4 & 0.796 & 0.867 & 0.872 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz Varianza -Covarianza

Esta matriz muestra el grado de relación funcional que existe entre una banda y otra, por lo tanto la diagonal solo muestra valores de uno (mayor valor que se puede encontrar en un índice de correlación), pues es hallar la relación entre la misma banda; estos valores determinan:

- Entre las bandas 2 y 3 esta el mayor grado de correlación, por que no hay una diferenciación completa entre una y otra, es decir, la longitud de onda que percibe la banda 2 (Rojo visible), no tiene una transición completa que al diferencie de la banda 3.
- Hay una alta correlación entre las bandas 3 y 4 por que estas dos bandas reciben información del espectro electromagnético de la zona infrarroja; y por lo tanto la información captada por estas es muy similar entre ellas.
- La correlación entre las bandas 1 y 2 y las bandas 1 y 3, es menor debido a que reciben información bien diferenciada del espectro electromagnético, de la parte del visible y una parte del infrarrojo.

En general se espera que las bandas del visible tengan un mayor grado de correlación, pero en este caso se presenta mayor grado de correlación debido a lo expuesto anteriormente.

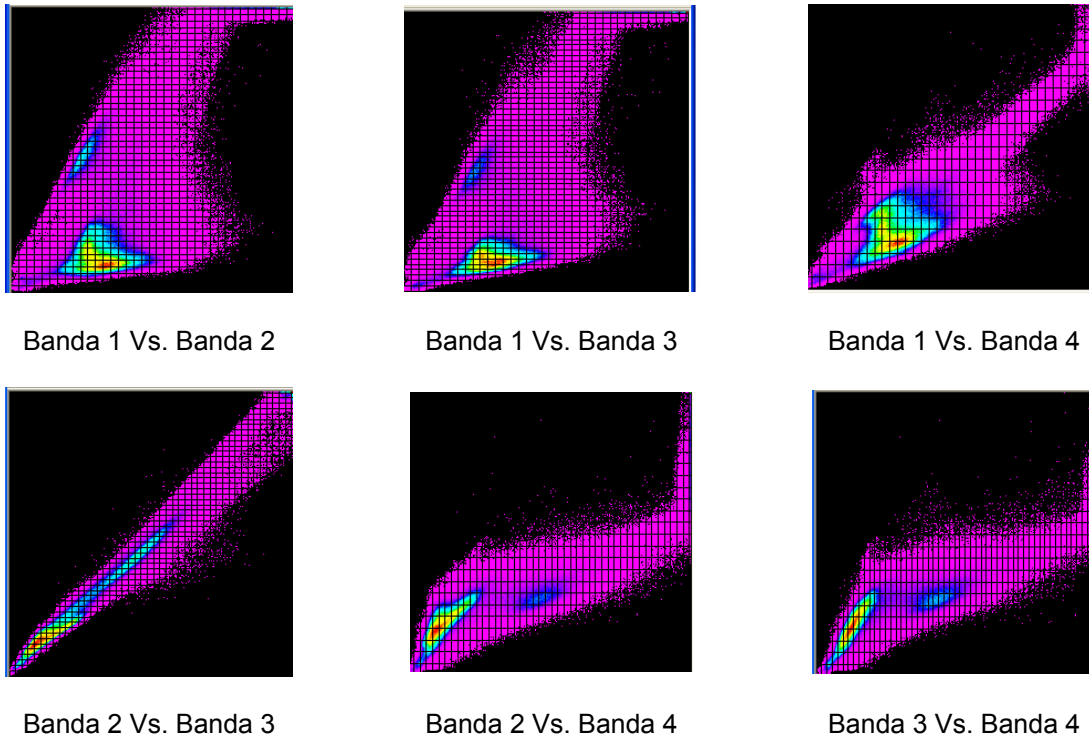


Figura 6-22. Diagramas de dispersión para todas las bandas

Como se puede ver en los gráficos de dispersión las bandas que están bastante correlacionadas son las bandas 2 y 3, pues las graficas entre ellas describen una función casi lineal; y la otras bandas que están bastante relacionadas son la 2 y 4, pero esto es debido a que ambas representan una parte del rojo e infrarrojo medio; las correlaciones acabadas de mencionar obedecen a una correlación positiva. E igualmente sucede con las bandas 3 y 4. De las demás bandas no se puede decir que halla una correlación directa, pues los gráficos no muestran ninguna clase de seguimiento a una función.

Factor de índice óptimo OIF (optimal index factor):

$$OIF = \frac{\sigma_I + \sigma_K + \sigma_L}{|\rho_{IK}| + |\rho_{IL}| + |\rho_{KL}|} \quad \sigma = \text{Desviación estándar para cada banda;}$$

ρ = Índice de correlación entre las bandas de combinación.

Aplicando la anterior fórmula con todas las posibles combinaciones de bandas obtuvimos:

COMBINACION	OIF
1,2,3	53.4405
1,2,4	45.6517
1,3,4	42.7179
2,3,4	41.1472

Tabla 6-7. Factor de índice óptimo

De acuerdo al índice óptimo la combinación de bandas que se ajustaría para una adecuada interpretación sería la combinación (1, 2, 3), ya que es en estas bandas en donde se presenta la menor correlación y por lo tanto más contraste; mas sin embargo esto lo verificaremos con la respuesta espectral de las coberturas presentes, de tal forma que se pueda proyectar por cada cañón del monitor las bandas que mejor respuestas espectrales ofrezcan.

Identificación visual de las principales coberturas presentes en la imagen y análisis de sus características espectrales.

Primero se observan las características de una determinada cobertura en cualquiera de las bandas. Se tienen en cuenta para esta interpretación preliminar de la imagen las siguientes coberturas: vegetación, construcciones, cultivos y cuerpos de agua.

Para establecer las coberturas predominantes en la imagen se tomaron puntos muestra en diferentes partes de la imagen, en los cuales se analiza la respuesta espectral.

Vegetación:

Las respuestas espectrales y la distribución de los puntos para tomar las respectivas respuestas en la imagen satelital se pueden apreciar en la siguiente grafica e imagen:

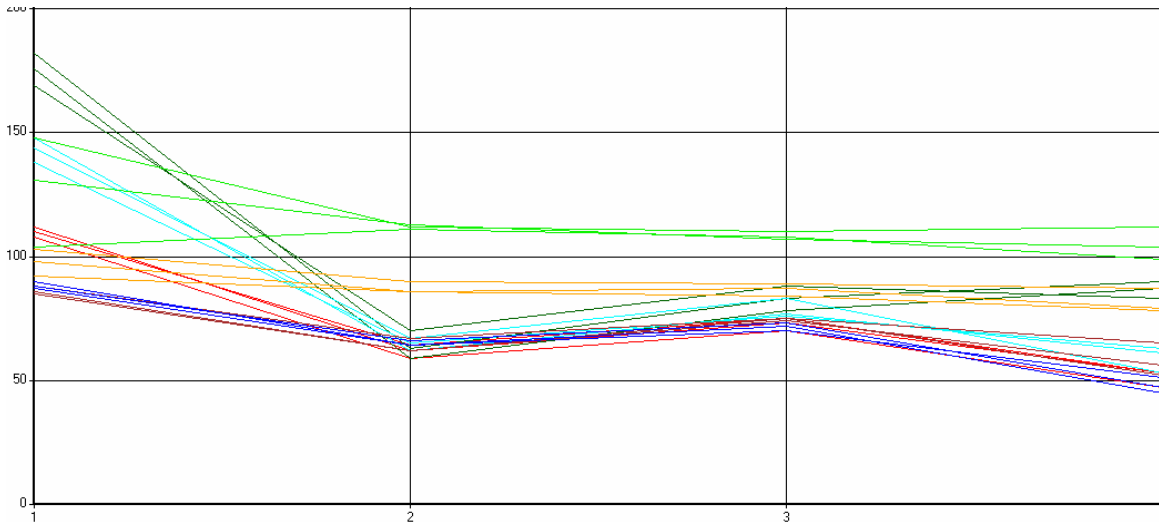
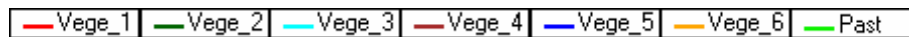


Figura 6-23. Perfil espectral



Para que sea un poco más notoria la diferenciación de las diferentes coberturas vegetales, se decidió colocar en una sola gráfica de curvas e imagen, todos los puntos de muestra.

Se han definido siete coberturas vegetales, en función de su respuesta espectral, la cual nos permite identificar el estado de la vegetación y su contenido de humedad.

Al observar la gráfica del perfil espectral observamos que el comportamiento espectral de los puntos seleccionados es muy similar entre si, es decir, el comportamiento de las firmas espectrales es muy similar; pues se trata de vegetación ya que todas las curvas diferente medida tienen un máximo o uno de sus valores máximos se encuentra en la banda 1 (banda verde del espectro visible), cabe notar que en la medida en que el valor sea mas alto en esta banda estaremos hablando de una vegetación mas vigorosa, o, mas sana en contraste con su baja reflectividad en la banda 2 (banda roja del espectro visible); si se sigue observando la gráfica vemos que hay otro máximo en la banda 3 (banda del infrarrojo cercano), la cual también presenta una buena respuesta de la vegetación en general, debido a las cavidades de aire internas que hay en la hoja, que difunden y dispersan la mayor parte de la energía y por lo tanto una mayor cantidad de energía reflejada y percibida por el sensor; y por ultimo vemos que la

respuesta en la banda 4 (infrarrojo medio) es baja, ya que la respuesta en esta banda depende principalmente de los contenidos de humedad de los objetos, es decir, entre menor sea el valor en esta banda, habrá una mayor cantidad de humedad, en otras palabras hay mayor reflectividad en esta banda según va disminuyendo el contenido de humedad, a partir de la 1.4 micras la vegetación sana se reduce su respuesta y se ve drásticamente en el infrarrojo medio.

Observando nuevamente la Figura 6-24, es evidente un comportamiento espectral para Vege_6 y Past diferente a lo expuesto anteriormente, viéndose la curva espectral mas plana, esto es característico de la hoja que a perdido su actividad clorofílica lo cual se percibe con una disminución de los niveles de reflectancia en la banda 3 (banda del infrarrojo cercano del espectro) y mostrando un aumento en la banda 2 (banda roja del espectro visible), que se contrasta con un aumento en la reflectividad de la banda 4 (banda del infrarrojo medio del espectro) ya que los contenidos de humedad son menores y por lo tanto una mayor respuesta en esta banda.

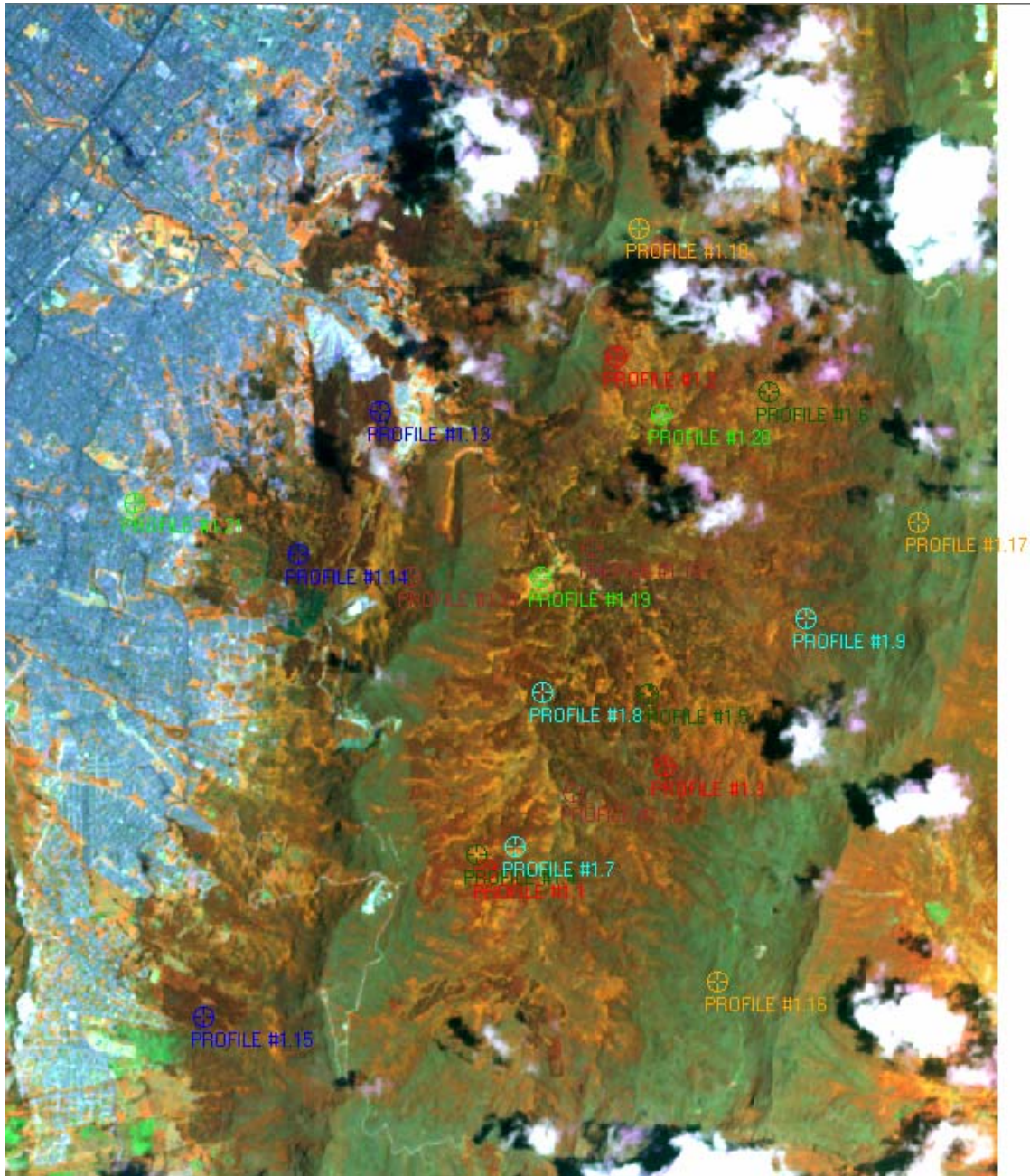


Figura 6-24. Distribución de muestras espectrales para la vegetación

En general para la clasificación de la cobertura vegetal, se hizo principalmente en base a las respuestas espectrales de las bandas, en simultáneo con un análisis de las diferentes texturas que se aprecian en las fotografías aéreas (formato análogo) de los años 1996 y 2004 a escalas 1:29000 y 1:21000 respectivamente. De

acuerdo a lo anterior se obtuvo una clasificación preliminar la cual necesita ser corroborada y detallada en campo, así:

TIPO VEGETACION	FOTOGRAFIA AEREA	IMAGEN SATELITAL RGB = (1,4,3)²
Vege_1	Textura: Gruesa, propia de vegetación con follaje denso. Tono: Gris oscuro Altura: Alta	Color: Verde – Café Profile 1.1, 1.2 y 1.3 Alta reflectividad en la banda 1 y 2; respuesta espectral de una vegetación vigorosa y con buen contenido humedad en las hojas por el descenso paulatino en la banda 4.
Vege_2	Textura: Fina, propia de vegetación con follaje poco denso. Tono: Gris Altura: Alta-baja	Color: Café oscuro Profile 1.4, 1.5 y 1.6 Vegetación muy vigorosa; con hojas que presentan alta concentración de pigmentos foto-sintéticos, debido al pico reflectivo en la banda 1, pero poco contenido de humedad ya que hay un ascenso en la respuesta de la banda 4.
Vege_3	Textura: Gruesa, follaje mas denso que la anterior pero menor que Vege_1. Tono: Gris oscuro Altura: Alta medio	Color: Verde Profile 1.7, 1.8 y 1.9 Vegetación vigorosa; con hojas que presentan concentración media de pigmentos foto-sintéticos, debido al aumento reflectivo en la banda 1, (pero en menor medida que el anterior tipo de vegetación), el contenido de humedad es bueno pues hay un descenso en la respuesta de la banda 4
Vege_4	Textura: Muy gruesa, de vegetación cuyo follaje es muy denso.	Color: Verde – Café Profile 1.10, 1.11 y 1.12

² RGB = (1,4,3), son las bandas que se proyectaron en el monitor, la banda 1 = banda verde del espectro visible, banda 4 = banda del infrarrojo medio, y banda 3 = banda del infrarrojo cercano

TIPO VEGETACION	FOTOGRAFIA AEREA	IMAGEN SATELITAL RGB = (1,4,3)²
	<p>Tono: Gris oscuro, más oscuro que la Vege_1.</p> <p>Altura: Media</p>	<p>Es una vegetación con poco contenido de pigmentos fotosintéticos debido a la repuesta presentada en la banda 1, y buen contenido de humedad por la respuesta presentada en la banda 4</p>
Vege_5	<p>Textura: Gruesa, follaje denso muy similar a la anterior.</p> <p>Tono: Gris oscuro más oscuro que la anterior</p> <p>Altura: Media</p>	<p>Color: Café oscuro</p> <p>Profile 1.13, 1.14 y 1.15</p> <p>Esta vegetación presenta menos pigmentación que la anterior, pero su contenido de humedad es bueno y muy similar al tipo de vegetación anterior.</p>
Vege_6	<p>Textura: Fina, follaje fino.</p> <p>Tono: Gris claro</p> <p>Altura: Baja</p>	<p>Color: Verde</p> <p>Profile 1.16, 1.17 y 1.18</p> <p>Curva espectral más plana, se presenta poca pigmentación en el follaje de este tipo de vegetación, y con poco contenido de humedad debido al aumento de respuesta en la banda 4.</p>
Past	<p>Textura: Muy fino, propia de pastizales</p> <p>Tono: Gris claro, mas claro que la anterior.</p> <p>Altura: Muy baja.</p>	<p>Color: Verde muy claro</p> <p>Profile 1.19, 1.20 y 1.21</p> <p>Curva espectral con un pico en la banda 1, por lo tanto con altos pigmentos fotosintéticos, son pastizales que presentan en comparación con el resto de vegetación los niveles mas bajos de humedad.</p>

Tabla 6-8. Generalidades de tipo de vegetación

Realización, evaluación de realces:

Realces de contraste, o, filtros radiométricos:

La banda en la que se realizaran realces de contraste es la banda 3, que como se menciono anteriormente tiene un contraste malo³, al igual que la banda 2, pero la banda 3 a diferencia de la 2 permite discriminar de una mejor manera vegetación.

Igualación de histograma:

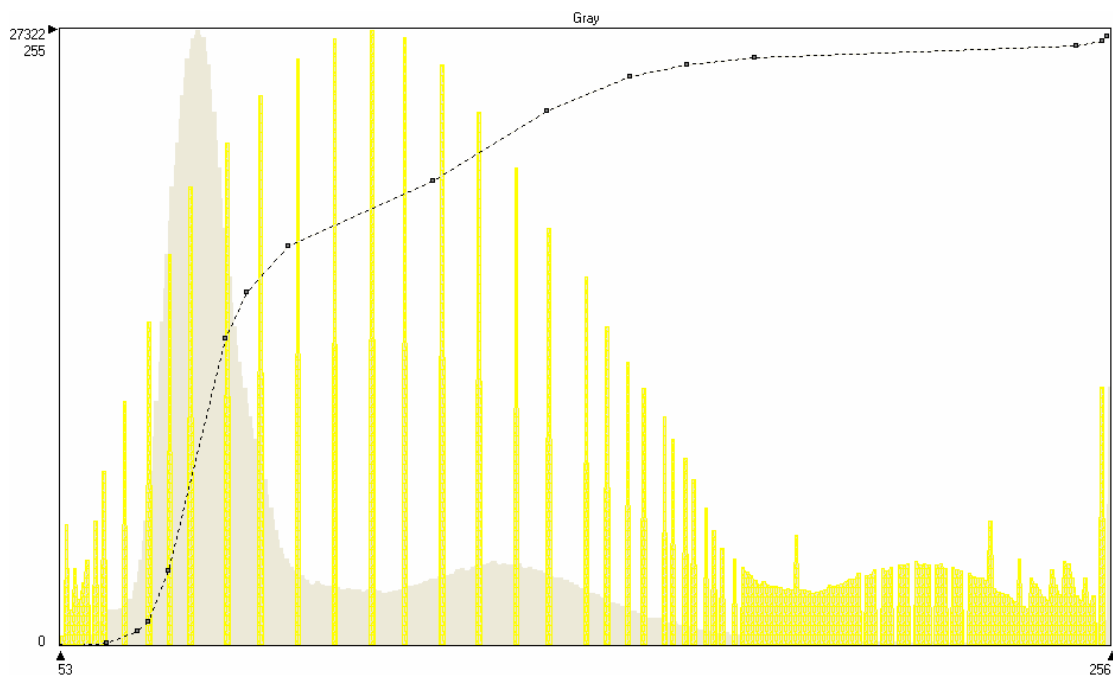


Figura 6-25. Histograma para la evaluación de histograma en la banda 3

³ Es oscura por que su histograma de imagen se encuentra hacia la izquierda de la media

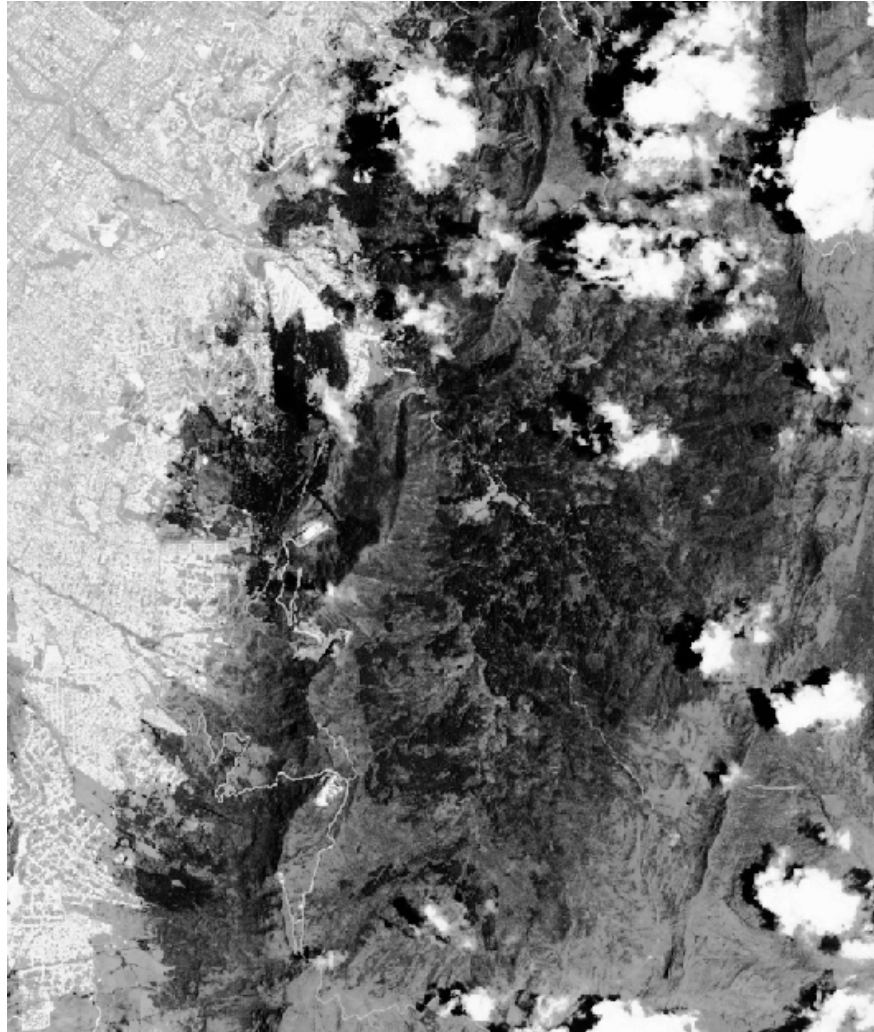


Figura 6-26. Realce de contraste – igualación de histograma

Los cambios que se dan en la imagen son:

Mayor rango de visualización

Se pueden discriminar la regularidad y distribución en el espacio de varias de las coberturas descritas anteriormente, específicamente la vegetación mas sana.

Expansión gamma:

Esta expansión depende del valor de gamma, permitiendo discriminar mejor los objetos según su reflectancia; para este caso el valor es de 2.30; con este valor lo que conseguimos es que los elementos de baja reflectancia se noten más. La

hicimos para este caso porque con valores gamma mayores para objetos de alta reflectancia el resultado es una imagen con muy poco contraste.

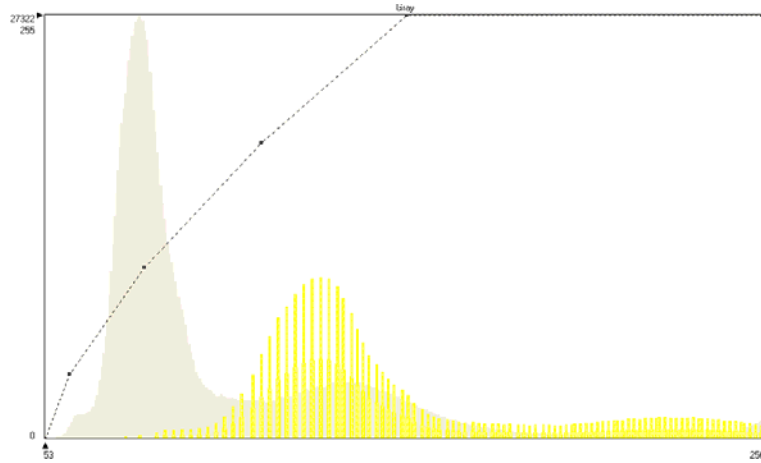


Figura 6-27. Histograma para la igualación gamma en la banda 3

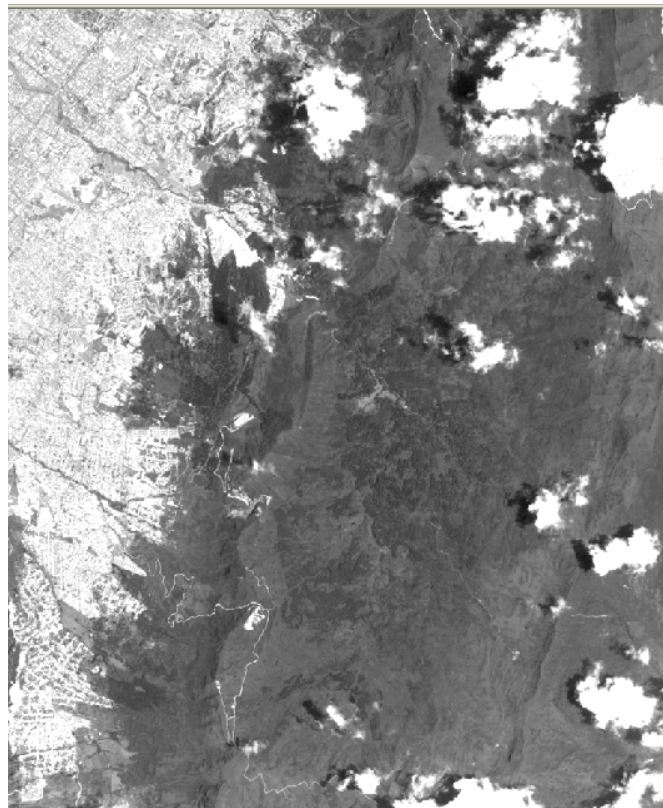


Figura 6-28. Realce de contraste - gamma

La aplicación de este contraste permite discriminar de una mejor manera todas las construcciones por su baja reflectancia, y se puede apreciar una mayor regularidad en algunos de los tipos de cobertura vegetal; por lo tanto este no es un buen realce ya que homogeniza en una gran medida la cobertura.

No se mostraron los demás filtros dado que los cambios generados en la imagen no son significativos, y sin cambios positivos para la interpretación. Finalmente el contraste que se usara es el de igualación de histograma, dado que es el que nos brinda una mejor información.

Filtros en el dominio espacial: estos operan sobre los valores de los píxeles basados en los valores de los píxeles contiguos, es decir, considera ampliamente la frecuencia espacial, que es la diferencia entre los valores más altos y más bajos de píxeles contiguos.

La ubicación de estos valores contiguos están dados por una ventana denominada kernel, que se construye alrededor de cada uno de los elementos. Para la realización de los filtros de paso alto y bajo usaremos un kernel de 3x3, para que rodee el punto que se desea modificar en una porción no muy grande de lo contrario se podrían tomar valores muy poco asociados al elemento; y se analiza para la combinación de color que mas información suministra para la interpretación.

Filtros de paso alto:

Debido a que los filtros de paso alto en el dominio espacial, refuerzan las diferencias en la frecuencia espacial, o sea la diferencia entre elementos, es decir, se realzan los bordes; es por eso que, esperamos se marque mas notoriamente la diferencia entre coberturas. Por lo anterior este tipo de filtros se le deben aplicar a imágenes o bandas en las cuales no sean tan fácilmente identificables las coberturas.

El primer filtro tiene un Kernel de 3x3, con la siguiente forma:

-1.000	-1.000	-1.000
-1.000	9.000	-1.000
-1.000	-1.000	-1.000

Al algoritmo es:

$$ND_f = \frac{\sum_{i=1}^n (ND_i * C_{fi})}{n}$$

ND_f = Nivel digital filtrado

ND_i = Nivel digital inicial

C_{fi} = Coeficiente de la celda (ij) del kernel

n = Numero de celdas del kernel

La imagen y el histograma de la imagen filtrada:

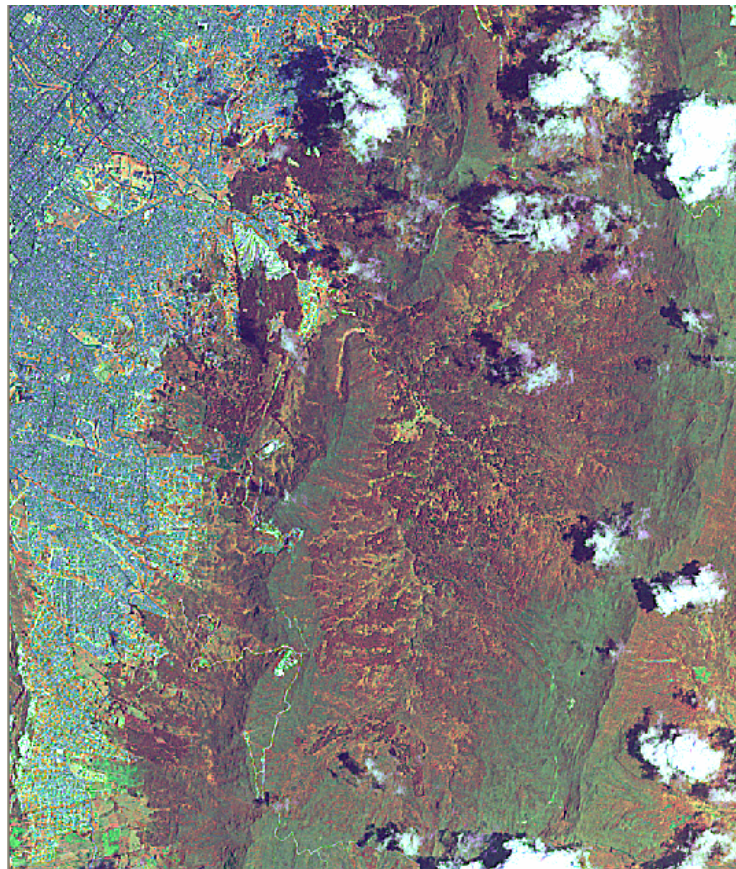


Figura 6-29. Imagen con filtro

Al aplicar el filtro a esta imagen hay un mejoramiento significativo para la interpretación, ya que el bordeamiento resalta las diferencias entre coberturas como vegetación alta, baja y laderas de montaña, igualmente las construcciones o suelos descubiertos no son mas identificables; por lo tanto podemos afirmar que si es positiva la aplicación de este filtro desde el punto de vista de identificación de coberturas.

El segundo filtro tiene un Kernel de 3x3, con la siguiente forma:

-1.000	1.000	1.000
-1.000	-9.000	1.000
-1.000	1.000	1.000

Este es un filtro ***Direccional Este***.

La imagen y el histograma de la imagen filtrada:

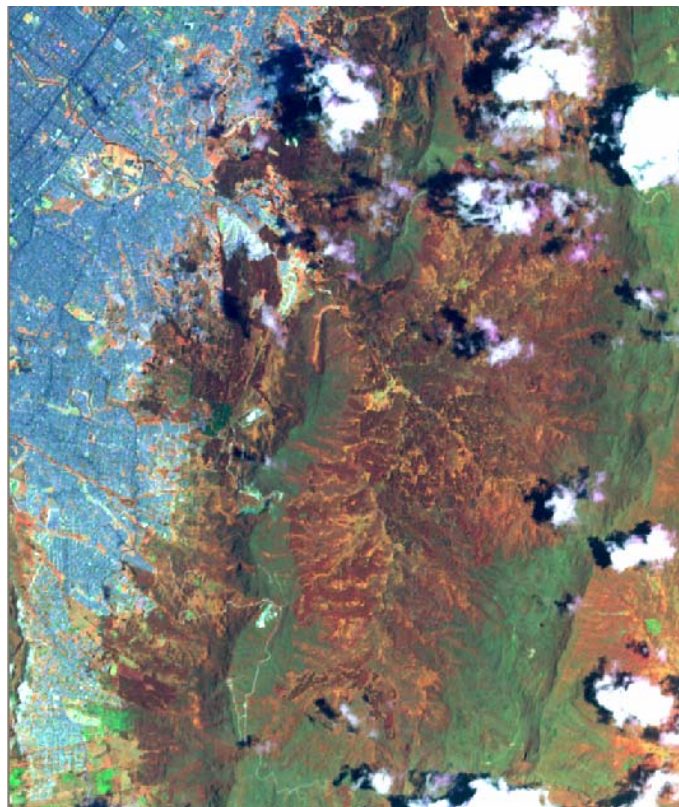


Figura 6-30. Histograma para la evaluación de histograma en la banda 3

La imagen filtrada con respecto a la original no ha cambiado significativamente; lo que sucedió es que la imagen se ha tornado un poco mas clara y con menos brillo, pero la imagen no mejora significativamente, es decir, en cuanto a diferenciación de coberturas no hay mejora.

Al aplicar otros filtros, no hubo cambios significativos en la imagen que se tradujeran en una buena diferenciación y por lo tanto identificación de coberturas, es por esto que el filtro usado en cuanto a identificación de coberturas es el primer filtro aplicado (Figura 6-30).

No se aplicaron filtros de paso bajo por su efecto homogenizador, el cual dificulta la interpretación de la imagen, en cuanto a uso y cobertura, además el principal uso de este filtro es para eliminar bandeamiento que presente la imagen, lo que no se da en esta imagen.

Filtros espectrales: Modifican los valores del nivel digital de cada píxel en función de los niveles digitales de todas las bandas

Transformación Tasseled Cap: esta transformación ofrece una manera de optimizar la visualización de los datos para estudios de vegetación; esta optimización se expresa en tres ejes principales denominados, brillo (el cual es una suma ponderada de todas las bandas), verdor (es ortogonal al brillo, y es un contraste entre las bandas del infrarrojo y el visible), y humedad (relacionado con la humedad del suelo y del dosel).

La transformación Tasseled Cap se realizó sobre la imagen que tenía el realce radiométrico igualación de histograma únicamente, debido a que al realizar la transformación en la imagen que también tenía el realce espacial no se obtenían los indicadores del estado de la vegetación esperados. La imagen obtenida al realizar la transformación Tasseled Cap es:

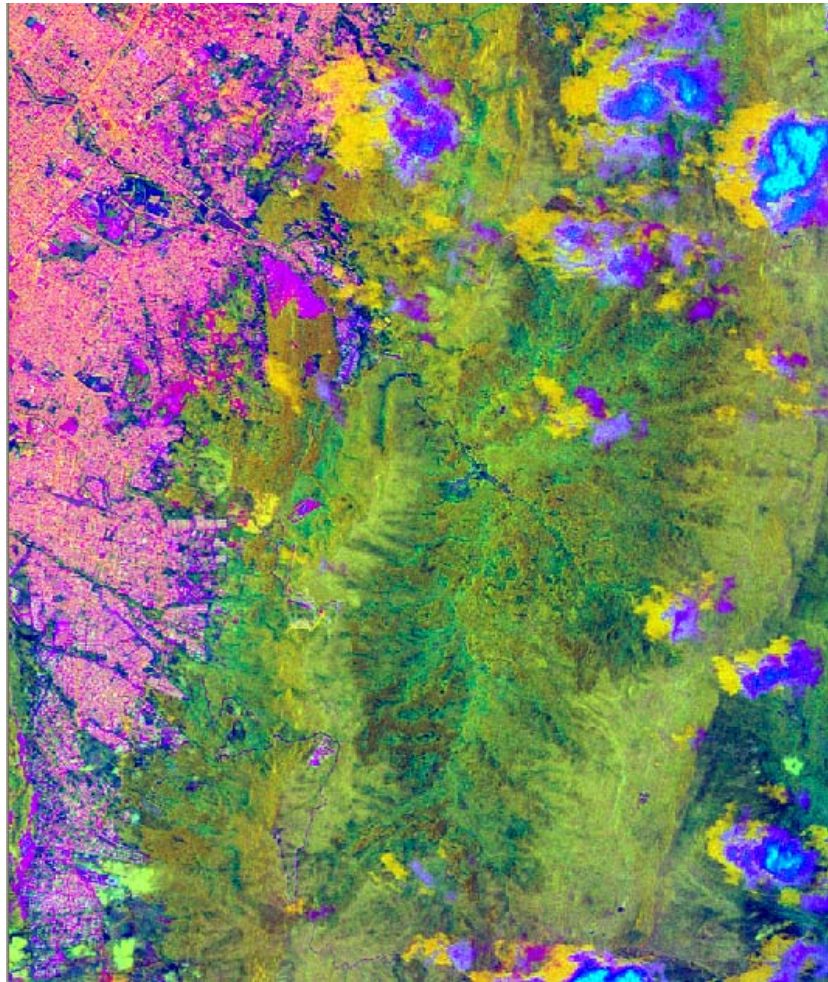


Figura 6-31. Imagen con índice de vegetación Tasseled Cap

Esta transformación utiliza índices ya predeterminados, es por eso que es necesario que su exactitud sea verificada en campo; mas sin embargo se observa en la imagen un mejor comportamiento visual, el cual permite obtener una abstracción visual del estado de la vegetación, ya que la banda con valores predominantes es el verdor; la banda del brillo lo que hace es resaltar la parte urbana y el efecto de las nubes y las sombras de las mismas.

RGB – IHS: esta transformación es la posibilidad que hay de pasar de un sistema color a otro que sea más similar a lo visto por el ojo humano, pero no tendrá características espectrales como tal. Este espacio de color alterno usa la intensidad (I = es el brillo total de la escena y varia de 0 a 1), la saturación (S = representa la pureza del

color y varia de 0 a 1), y el matiz (H = es representativo del color o de la longitud de onda dominante del píxel; varia desde 0 en el punto medio del rojo hasta el verde y el azul hasta volver al punto medio del rojo en 360); la imagen que se obtiene es:

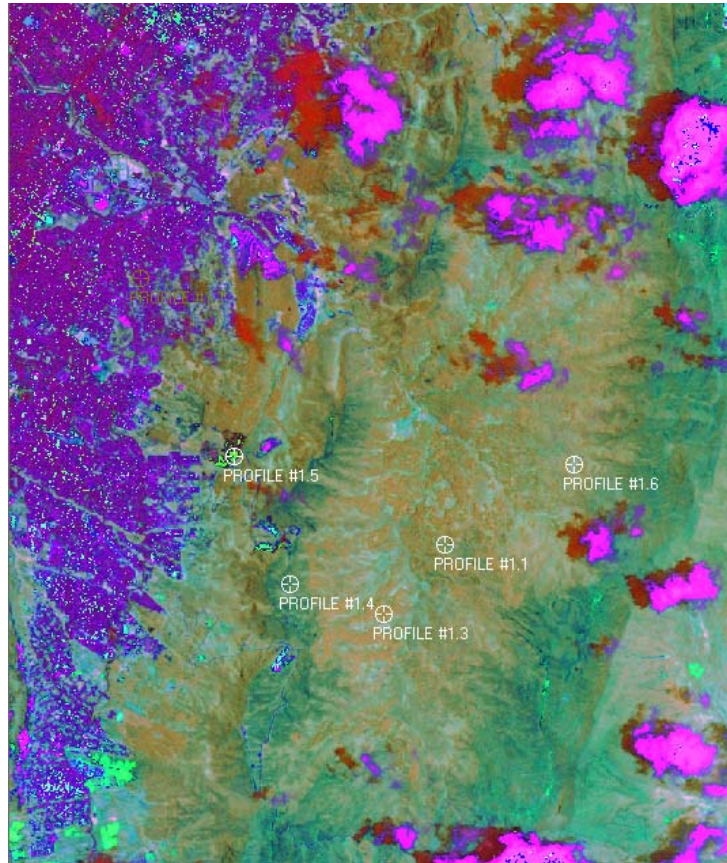


Figura 6-32. Imagen con transformación

Este nuevo despliegue de colores nos ofrece una visualización, diferente a los que habíamos observado hasta el momento, permitiéndonos una mejor capacidad para discriminar coberturas como lo son suelos desnudos resaltados con un verde fluorescente; y diferentes tonalidades verde – café para la vegetación arbórea, y las construcciones de un tono magenta oscura.

Para analizar la nueva imagen IHS, se hace de una manera similar a como se hizo con las bandas originales, es decir, a partir de una respuesta de valores de niveles digitales, que como ya se menciona para esta transformación ya no son niveles de reflectancia, si no valores de saturación, matiz e intensidad. De acuerdo a lo anterior, al observar los valores para H, I y S en los lugares en los que se tomaron

muestras en la imagen para zonas que se consideran vegetación, los valores de H oscilan entre 90° y 110° , para I oscilan entre 0.30 y 0.35 y para S entre 0.25 y 0.30, lo cual nos sugiere que se tratan de coberturas vegetales con poca humedad y bajos contenidos de clorofila, dado que una hoja sana y vigorosa en el espectro visible se vería verde puro, es decir, con valores de H muy próximos a 120° , I valores próximos a 1 y S también con valores próximos a 1, pues estos valores están muy cercanos al valor del color verde.

Transformación de componentes principales: Este filtro se utiliza para comprensión de datos y los datos redundantes se compactan en unas solas bandas, es por eso que se deben tener cuenta las bandas que proporcionen las más altas varianzas de los datos, para así determinar en donde se compacta toda la información.

La matriz de covarianza después de realizar la transformación de componentes principales es:

4593,31239	4,92E-07	-5,31E-09	3,22E-08
4,92E-07	577,584675	-1,22E-07	1,28E-08
-5,31E-09	-1,22E-07	69,1803427	-2,45E-08
3,22E-08	1,28E-08	-2,45E-08	10,4358811

Matriz covarianza-transformación componentes principales

Los valores de la diagonal principal son las varianzas de cada banda de componente principal; de acuerdo a esto las bandas de componentes principales con más información son la 1 y 2 pues son las bandas con la varianza más grande.

1	3,02E-10	-9,42E-12	1,47E-10
3,02E-10	1	-6,09E-10	1,65E-10
-9,42E-12	-6,09E-10	1	-9,13E-10
1,47E-10	1,65E-10	-9,13E-10	1

Matriz covarianza-transformación componentes principales

En esta matriz para los componentes, los valores por fuera de la diagonal principal

son aproximadamente cero, es decir, no hay correlación entre ellos que es lo que se pretende con la transformación de componentes principales al rotar los ejes de coordenadas.

Todos los procesos de filtrado hasta el momento son utilizados para corroborar las coberturas identificadas y para profundizar en aspectos mencionados como lo son estado de la vegetación, humedad, vigorosidad; pero para la clasificación se utiliza la imagen con realce de contraste de igualación de histograma.

Clasificación de la imagen:

La clasificación que permite realizar la imagen es a nivel semidetallado, con lo cual se puede evaluar las actividades del hombre sobre determinadas coberturas terrestres; es por esto que hay que hacer el respectivo complemento con una visita a campo.

La descripción del esquema de clasificación utilizado y los procesos realizados serán descritos a lo largo del proceso de clasificación.

Para realizar la clasificación usaremos un índice de vegetación, el cual se adiciono a la imagen; de acuerdo a lo anterior, la capa del índice de vegetación quedo en el layer 5, y en total quedaron 8 capas, ya que también a la imagen se incluyeron las capas obtenidas en la transformación IHS; se uso un índice de vegetación debido a que el usuario final del mapa de uso y cobertura necesita saber el estado de los recursos, y este índice está diseñado para resaltar la vegetación vigorosa.

El análisis inicial será en la imagen original la cual ya está georreferenciada; el análisis se hace con la combinación de color RGB (513), en donde el layer 5 corresponde a la banda del índice de vegetación, el layer 1 a la capa verde del visible y el layer 3 corresponde a la banda infrarrojo cercano.

La imagen a clasificar es:

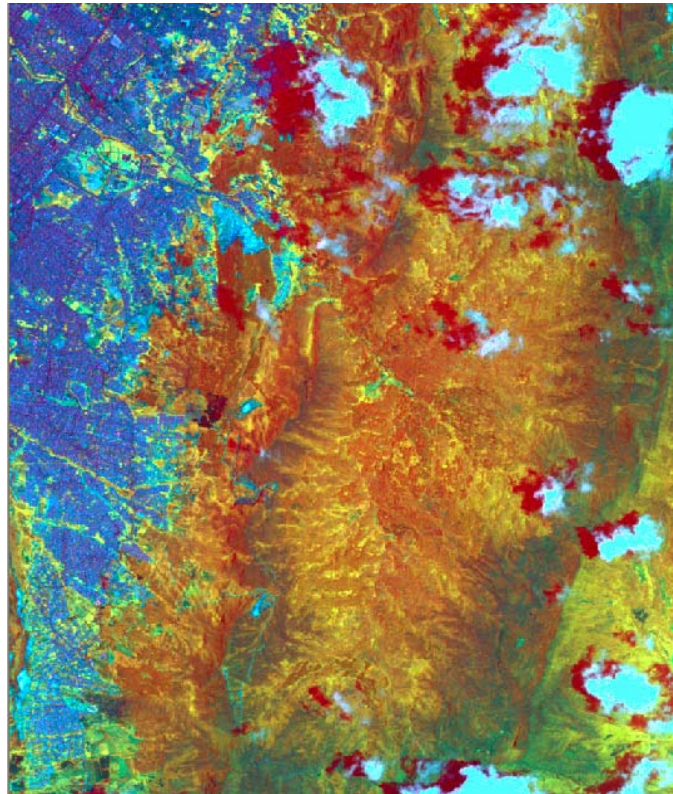


Figura 6-33. Imagen a clasificar

Evaluación y análisis de exactitud temática.

Se hizo una clasificación supervisada no paramétrica, es decir, aquella que está basada en objetos discretos (polígonos o rectángulos), y por lo tanto los métodos para evaluar este tipo de clasificación es mediante un concepto denominado alarmas; con cierto nivel de referencia y conociendo la mayoría de los patrones del área de estudio, esto debido a que se contó con una interpretación de fotografías aéreas⁴, utilizamos este método de alarma que está basado en la regla de decisión del paralelepípedo.

La evaluación consiste en comparar una clasificación de firmas estimada con respecto a una original, esta evaluación esta basada en la regla de decisión del paralelepípedo, en la que los píxeles que se ajustan al criterio son iluminados en la imagen.

⁴ Fotografías de los años 2004 y 1996 a escala 1:21000 y 1:29000, respectivamente – fuente IGAC

Los polígonos de firma definidos para escoger la clase son:

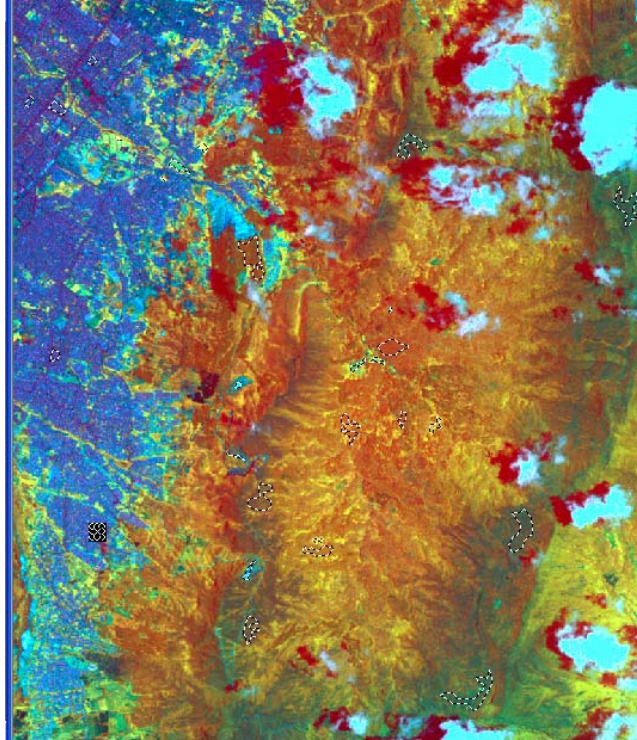


Figura 6-34. Imagen con polígonos de firma

A continuación se presentan las firmas para definir las clases:

Nombre de la signatura	Color
Vegetación tipo 1	Verde oscuro
Vegetación tipo 2	Amarillo
Vegetación tipo 3	Marrón
Vegetación tipo 4	Rojo
Vegetación tipo 5	Magenta
Vegetación tipo 6	Verde grisáceo
Pastizales	Verde brillante
Construcciones	Cian
Lotes tipo 1	Rosa
Suelos desnudos	Naranja claro
Sombra	Verde muy oscuro
Nubes	Blanco

De acuerdo con esto, las clases vegetales propuestas anteriormente fueron identificadas claramente, debido a los realces y filtros durante el procesamiento de la imagen permitiendo identificar coberturas no interpretadas en la imagen sin ningún tipo de procesamiento; de tal modo que se obtuvieron 6 tipos de vegetación, los suelos desnudos y en el área urbana se identificaron lotes tipo 1 los cuales contienen maleza; fue también necesario considerar las nubes ya que este ruido estaba afectando la clasificación igualmente las sombras que ellas producen.

Debido a que la clase de clasificación que se uso fue supervisada no paramétrica, se hizo una constatación con el método de alarmas; por lo tanto se analiza la separabilidad de clases y de bandas.

Separabilidad

Para observar y analizar la separabilidad se uso la distancia euclidiana, la cual puede calcularse para cualquier combinación de bandas, de tal forma que sea capaz de discriminar en qué combinación de bandas es más fácil hacer la separación de clases, es decir, de discernir entre una cobertura y otra. A continuación se presenta este reporte.

Best Average Separability												
Bands				AVE	MIN	Class Pairs:						
						1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	1: 6	1: 7	1: 8
						1: 9	1:10	1:11	1:12	2: 3	2: 4	2: 5
						2: 6	2: 7	2: 8	2: 9	2:10	2:11	2:12
						3: 4	3: 5	3: 6	3: 7	3: 8	3: 9	3:10
						3:11	3:12	4: 5	4: 6	4: 7	4: 8	4: 9
						4:10	4:11	4:12	5: 6	5: 7	5: 8	5: 9
						5:10	5:11	5:12	6: 7	6: 8	6: 9	6:10
						6:11	6:12	7: 8	7: 9	7:10	7:11	7:12
						8: 9	8:10	8:11	8:12	9:10	9:11	9:12
						10:11	10:12	11:12				
1	2	3	4	141	12	45	26	26	77	97	14	47
5	6	7				135	248	100	339	70	69	48
8						60	39	58	146	240	142	315
						12	97	121	34	54	133	256
						76	353	91	116	31	46	123
						245	76	344	47	65	55	123
						199	160	273	89	93	143	203
						182	263	35	127	238	105	327
						105	214	109	307	136	135	255
						269	138	382				

Reporte de separabilidad

Se observa que la mejor separabilidad entre bandas está dada por la combinación entre las capas 3, 5, y 4, mas sin embargo para la elaboración del mapa de coberturas usaremos la combinación de bandas (5,1,3), debido a que es conveniente tener una combinación en la que se hagan participe banda del infrarrojo cercano que nos brinda información sobre el estado de la vegetación, visualmente esta combinación brinda una separabilidad favorable para la interpretación.

Definición del mapa de coberturas:

Para la elaboración del mapa de coberturas, primero se realizó la clasificación supervisada, con el fin de colocar todas las clases (coberturas) al mismo tiempo en una imagen raster obteniéndose la siguiente imagen:

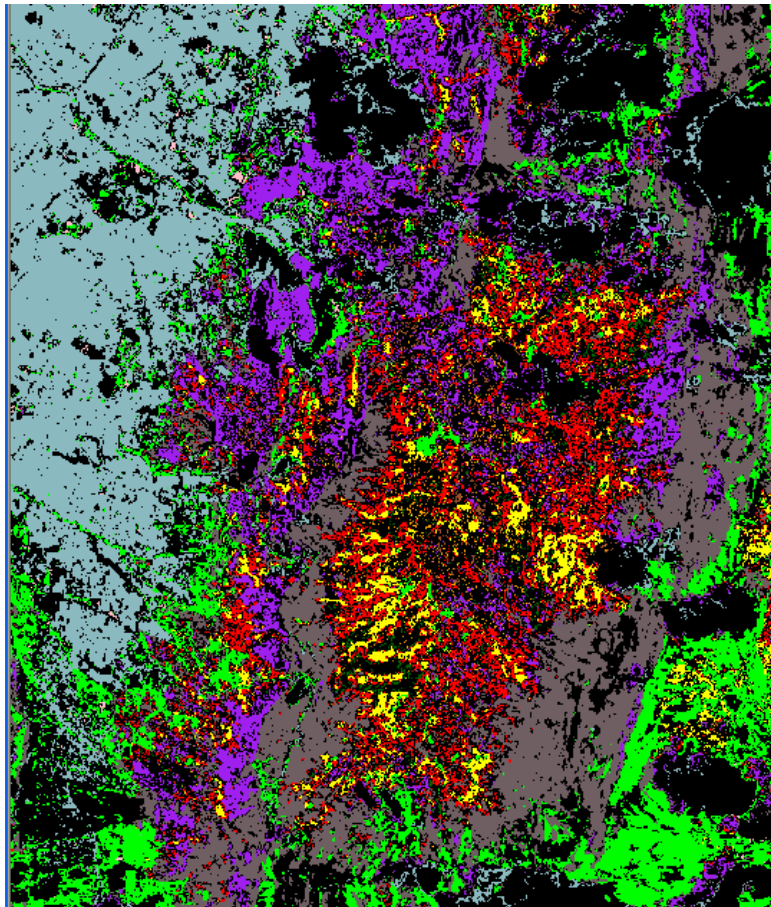


Figura 6-35. Imagen clasificada

Como se observa el muestreo en la imagen no ha sido suficiente, para la elaboración de la interpretación de uso y cobertura; es por esto que se han hecho pruebas, muestreos y una homogenización de imágenes prueba dado que se presentan demasiados puntos sueltos, lo cual puede conllevar a errores de interpretación, de tal manera que el resultado de uso y cobertura, ahora es:

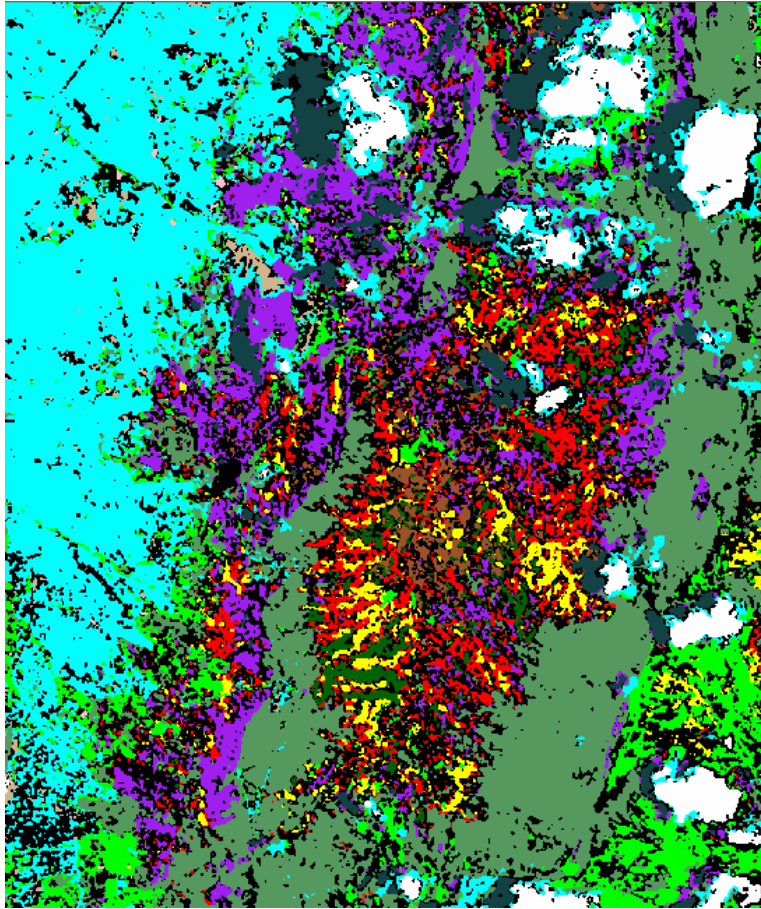


Figura 6-36. Imagen clasificada – remuestreada, homogeneizada.

Fue necesario realizar un suavizamiento a la imagen clasificada para finalmente obtener:

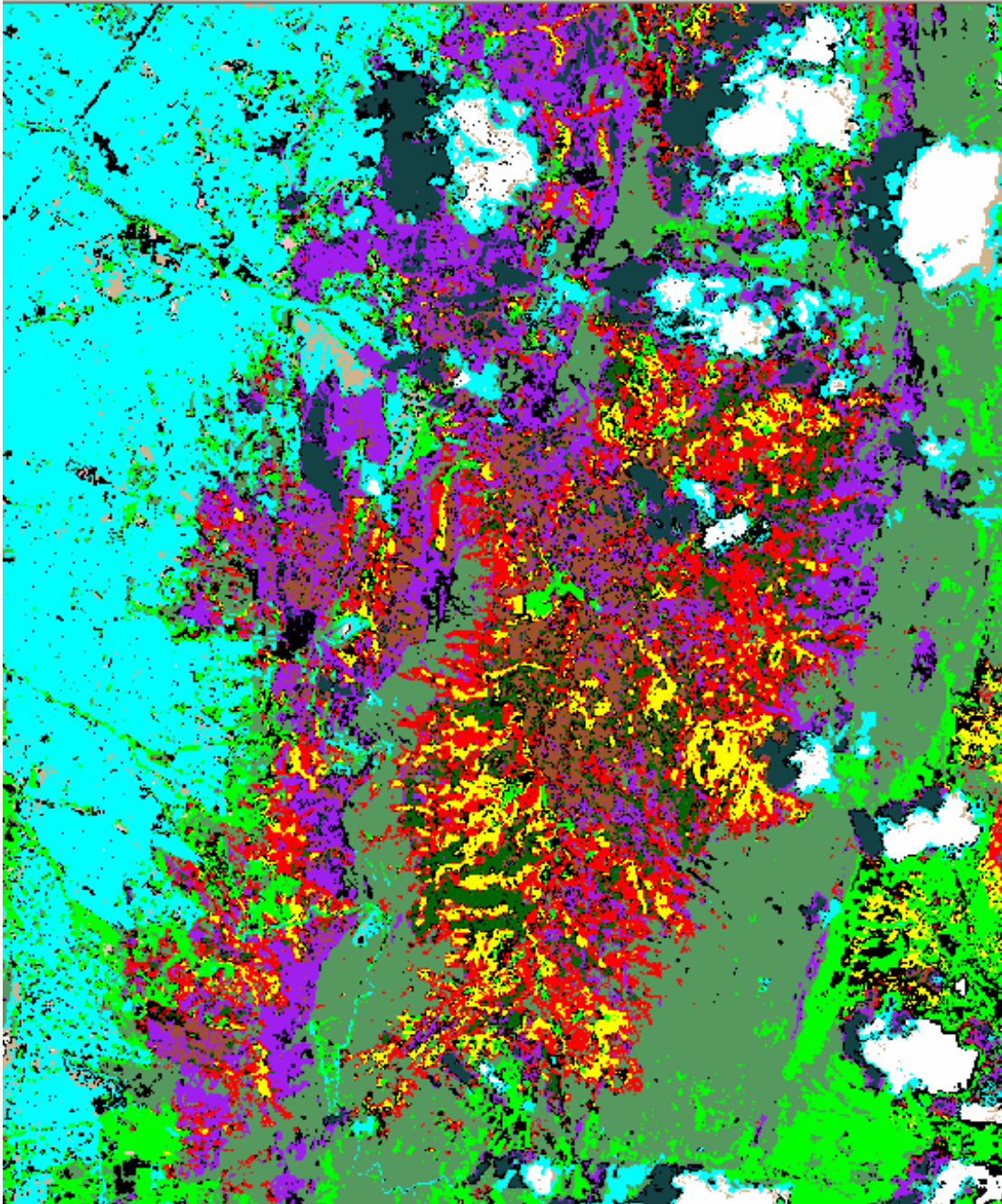


Figura 6-37. Imagen suavizada

Al realizar un análisis de los usos y coberturas utilizando esta imagen se presenta un inconveniente por la presencia de las nubes y sombras en la imagen; de tal

modo que el resultado obtenido hasta el momento necesita de una edición para lo cual es necesario realizar un trabajo de campo; de confrontación y verificación.

La mejor forma de estudiar la cobertura con el propósito de planificar mejor su manejo se hizo realizando un análisis que incluyó factores visibles y no visibles de la imagen del sensor remoto.

6.6.2 Control de campo mapa de uso y cobertura

A partir del reconocimiento y comprobación de campo, se analizó la imagen que había sido procesada digitalmente y se ajustó la clasificación obtenida anteriormente con los datos de campo, estableciendo como resultado delineaciones ajustadas con la respectiva leyenda, los puntos de control prioritarios en el trabajo de campo incluían aquellos donde la imagen presentaba alta nubosidad y sombras.

Para el levantamiento del uso y cobertura de la zona de estudio se utilizó el “Sistema de clasificación CIAF”, estableciendo los criterios de jerarquización de clases correspondientes a categorías en función de los parámetros fisonómicos estructurales. La clasificación consta de los siguientes niveles categóricos:

1. Exploratorio
2. Reconocimiento
3. Semidetallado
4. Detallado

A continuación se presenta la clasificación de uso y cobertura con una descripción de cada una de las categorías encontradas en el área de estudio.

Posteriormente se definirán y explicarán cada una de las categorías, con los respectivos puntos de control de la información recolectada en campo.

SIMBOLO	TIPO DE COBERTURA	TIPO FISIONÓMICO	TIPO FLORISTICO	USO FUNCION
4.A.1.a	Bosque	Natural	Vegetación arbórea densa con especies nativas, muy poco intervenida, de las partes altas, más frías y húmedas. De suelos profundos orgánicos, francos a pesados pero bien drenados. Este tipo de bosque se ubica entre los 2500 - 3300 msnm en laderas, pies, cañadas y coluvios. Se integra en las facies riparias con los bosques de coloradito (<i>Polylepis quadrijuga</i>). Frecuentemente asociada a los matorrales. La altura que alcanza este tipo de vegetación esta entre: 20-30m. Con predominio de las siguientes especies: <i>Higueron (Oreopanax Bogotense)</i> , <i>Acacia Japonesa</i> , <i>Corono (Xylosma Speculiferum)</i> , <i>Arrayan (Mycianthes Leucoxylla)</i> , <i>Rodamonte (Escollonia Myrtiloides)</i> , <i>Sauco De Monte (Viburnum Triphylum)</i>	Zona de protección
4.A.2.a	Bosque	Natural	Vegetación arbustiva poco densa con especies nativas en donde existan precipitaciones permanentes y mucha nubosidad, con escasa intervención. Se encuentra entre los 2500–3300 msnm, en laderas de suelos arenosos, orgánicos, profundos y bien drenados, ocasionalmente rocosos. Este vegetación tiene una altura que oscila entre 15-20m que se presenta asociada con <i>Chusquea Tessellata</i> , pero con predominio de: <i>Helecho (Blechnum Láxense)</i> <i>Canelo de páramo (Drimys Granadensis)</i> , <i>Encenillo (Weinmannia Tomentosa)</i>	Zona de protección.
4.A.3.a	Bosque	Natural	Vegetación arbustiva predominante de chusque de la clase <i>Chusquea scandens</i> Gramineae, moderadamente intervenida dominante de las series riparias, de cañadas y de laderas atmosféricamente perhúmedas es la formadora de la mayoría de los típicos chuscales o carrizales del área, se ubica entre 2750–3300 msnm.	Zona de protección.

SIMBOLO	TIPO DE COBERTURA	TIPO FISIONÓMICO	TIPO FLORISTICO	USO FUNCION
4.A.4.a	Bosque	Natural	<p>Vegetación arbórea densa con especies que exigen gran contenido de humedad y materia orgánica del suelo. De pendientes suaves en suelos pesados pero bien drenados. Puede hallarse en la transición a subpáramo. La altura promedio que alcanza este tipo de vegetación esta entre 5-15m, ubicados a una altura entre</p> <p>2600–3200 msnm, las especies predominantes de esta categoría son: <i>Cruz de mayo (Laurel Myrsine Parvifolia)</i> que es uno de los arbustos más abundantes, <i>Mortiño (Hesperomeles Goudotiana)</i>, <i>Sauco De Monte (Viburnum Triphylum)</i>, <i>Uvo de Anis (Cavendishia Cordifolia)</i></p>	Zona de protección
4.B.1.a	Bosque	Plantado	<p>Vegetación arbórea localizada en zonas de páramo y subpáramo con predominio de pino de talla elevada 30m de altura, pero zonas cerca de las construcciones se encuentra en mezcla con eucaliptos. La especie predominante de pino es: Pino de Monterey, Radiata o Insigne (<i>Pinus radiata</i>) en mezcla con <i>Eucalyptus Globulus</i> que puede alcanzar los 60m de altura. Estos árboles se adaptan fácilmente a elevadas alturas sobre el nivel del mar.</p>	Zona de protección
4.B.2.a	Bosque	Plantado	<p>Vegetación arbórea plantada de ciprés y pino que soportan tanto los suelos ácidos como los básicos. Estos árboles soportan muy bien el calor y la sequía, no así los grandes fríos (temperaturas inferiores a -10 °C) rechaza los suelos muy húmedos o arenosos, mientras más fértiles y profundo el suelo mayor es el desarrollo, pueden alcanzar una altura de 30m, se ubican en la zonas de páramo y subpáramo. Especie predominantes: <i>Cipres (Cupresuss Lusitania-Sempervirens)</i>, <i>pino silvestre (Pinus sylvestris en variedad pátula)</i></p>	Zona de protección

SIMBOLO	TIPO DE COBERTURA	TIPO FISIONÓMICO	TIPO FLORISTICO	USO FUNCION
3.C.1.a	Vegetación herbácea	Páramo	<p>Vegetación herbácea natural con moderada a escasa intervención cuyas especies son: <i>Paja De Ratón (Calamagrotis Efusa)</i>, <i>Pajonal, Frailejón (Espelia Grandiflora)</i></p> <p><i>Con predominio de Frailejón (Espeletia moritziana)</i> que puede alcanzar hasta los 2m de altura y se localiza en alturas superiores a los 2800 msnm.</p>	Zona de protección.
3.A.2.b	Vegetación herbácea	Pastizales	<p>Pastos en pequeñas áreas, tanto en la zona urbana como rural, algunos de ellos con manejo agronómico; las especies predominantes son: Carreton Blanco (<i>Trifolium Repens</i>), Falsa Poa (<i>Holcus Lanatus</i>),</p> <p>Pasto de Olor (<i>Anthoxanthus Odoratum</i>)</p>	Zona de conservación
6.b.1.a	Tierras Eriales	Suelo desnudo	Zonas que no presentan cobertura vegetal, por canteras o minas o por afloramientos rocosos.	Canteras y/o erosionados
1.A	Construcciones	Urbanas		

Figura 6-38. Leyenda de uso y cobertura de la cuenca alta del río San Cristóbal.

A continuación se describen los puntos de control para la determinación del uso y cobertura de la zona de estudio.

PUNTOS DE CONTROL

Los puntos de control corresponden a puntos georreferenciados cuyas coordenadas están en datum Bogotá, y coordenadas planas con origen Bogotá, en ellos se describe la vegetación observada que corresponde a los polígonos determinados en el mapa.

1. Punto de control N°1

Coordenadas: Latitud: 4° 34'17"

Longitud: 74°02'11.3"

Planas: Este: 104938.331

Norte: 96937.860



Fotografía 6 - 52. *Vegetación tipo 4.A.4.a y 3.C.1.a: Agraz, canelo de páramo, cruz de mayo, encenillo, polypepsis, mortiño, pajonal; al fondo de las imágenes frailejón (Espelia Grandiflora)*

2. Punto de control N°2

Coordenadas: Latitud: 4° 34'26.4"

Longitud: 74°02'22.6"

Planas: Este: 104589.819

Norte: 97226.665



Fotografía 6 - 53. **4.A.4.a y 3.C.1.a:** Mortiño, Sauco De Monte, Uvo de Anis, cruz de mayo, encenillo, polypepsis, mortiño, pajonal; en la imagen derecha frailejón (*Espelia Grandiflora*)

3. Punto de control N°3

Coordenadas: Latitud: 4° 34'28.0"

Longitud: 74°02'38.1"

Planas: Este: 104111.825

Norte: 97275.759



Fotografía 6 - 54. **4.A.2.a** Helecho, Canelo de páramo, Encenillo con mezcla de frailejón (*Espelia Grandiflora*), chilco, Gaque, mortiño; al fondo de la imagen pino silvestre.



Fotografía 6 - 55. **4.B.2.a y 3.C.1.a** Al sur de este punto se observa (al fondo) cobertura de pinos y ciprés, en la imagen de la izquierda vegetación observada al noroccidente del punto, frailejón con pajonal.

4. Punto de control N°4

Coordenadas

Geográficas: Latitud: 4° 33'40.447"

Longitud: 74°4'20.164"

Planas: Este: 100964.627

Norte: 95814.045



Fotografía 6 - 56. **1.A** Al sur del punto se encuentran construcciones en medio de pequeñas manchas de retamo espinoso y sanalotodo. Barrio Aguas claras.



Fotografía 6 - 57. **3.A.2.b y 4.B.1.a** En el punto se encuentran Pastizales y al occidente de este una cobertura de Eucalipto.

5. Punto de control N°5

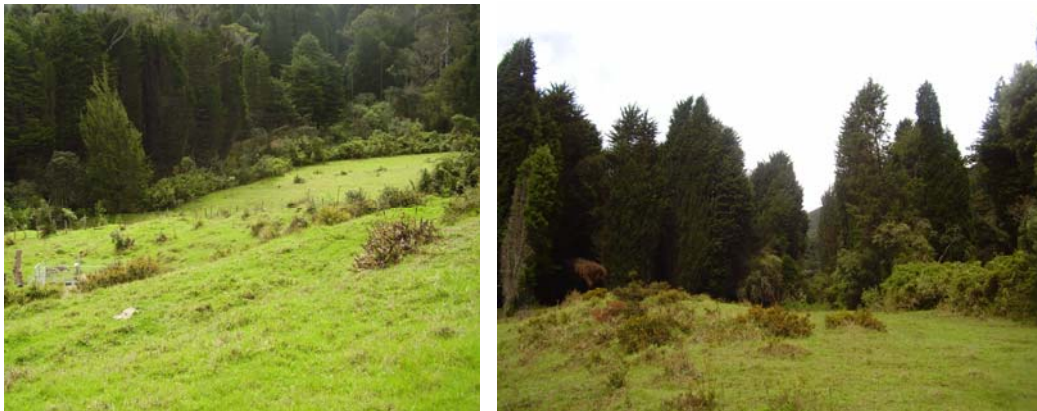
Coordenadas

Geográficas: Latitud: 4° 33'14.047"

Longitud: 74°03'38.566"

Planas: Este: 102247.589

Norte: 95002.952



Fotografía 6 - 58. **3.A.2.b** . Pastizal de tipo Falsa Poa (*Holcus Lanatus*), rodeado por pino silvestre (pino espátula), ciprés y vegetación arbustiva.



Fotografía 6 - 59. **4.A.3.a.** Vegetación arbustiva predominante de chusque de la clase *Chusquea scandens* Gramineae, moderadamente intervenida. Predominante de zonas húmedas cañadas y de laderas. Vegetación ubicada al norte de este punto.



Fotografía 6 - 60. **4.B.1.a** PinoMonterey, Radiata o Insigne (*Pinus radiata*), que forma una cama en el suelo de sus agujas (de aproximadamente 15 cm de longitud). Vegetación ubicada al occidente de este punto.

6. Punto de control N°6

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 33'12.347"

Longitud: 74°03'39.166"

Planas: Este: 102229.093

Norte: 94950.710



Fotografía 6 - 61. 4.A.4.a Vegetación arbórea densa mezcla de chusque con especies predominantes de Laurel, Mortiño, Sauco De Monte, Salvio Amargo, Uvo de Anis.



Fotografía 6 - 62. 4.A.2.a, 4.A.3.a y 4.B.2.a Mezca de vegetación con predominio de encenillo, rodamonte, Salvio Amargo, ciprés y pino radiata. Vegetación ubicada al sur del punto.

7. Punto de control N°7

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 33'03.347"

Longitud: 74°03'43.965"

Planas: Este: 102081.107

Norte: 94674.123



Fotografía 6 - 63. **4.B.1.a** Pino silvestre en la variedad ibérica, de altura aproximada de 30m, copa irregular, se encuentra en un suelo fértil cubierto de Musgo (*Sphagnum Magellanicum*).

8. Punto de control N°8

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 33'0.647"

 Longitud: 74°03'46.665"

Planas: Este: 101997.855

 Norte: 94591.142



Fotografía 6 - 64. **4.B.1.a** Pino silvestre, de altura aproximada de 30m, copa irregular, se encuentra en un suelo fértil cubierto de Musgo (*Sphagnum Magellanicum*), como en mezcla con vegetación arbórea densa de chusque combinado.

9. Punto de control N°9

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 32'1.147"

Longitud: 74°03'44.365"

Planas: Este: 102068.781

Norte: 94606.517



Fotografía 6 - 65. **4.A.1.a** Vegetación arbórea densa, muy poco intervenida con especies nativas: Higuerón, Acacia, Arrayán, Corono, Rodamonte, Aliso, Sauco de Monte, Chusque (Chasquea Tessellata). Ubicadas en zonas de alta pendiente.



Fotografía 6 - 66. **4.A.3.a** Vegetación arbustiva predominante de chusque de las clases Chusquea scandens Gramineae y Chusquea Tessellata.

10. Punto de control N°10

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 32'53.947"

Longitud: 74°03'44.865"

Planas: Este: 102053.391

Norte: 94385.262



Fotografía 6 - 67. **4.B.2.a** Vegetación arbórea plantada de ciprés, se encuentra en un suelo fértil cubierto por helecho, mezclado con especies como Canelo de páramo (*Drimys Granadensis*), Encenillo (*Weinmannia Tomentosa*).

11. Punto de control N°11

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 32'24.648"

Longitud: 74°03'44.065"

Planas: Este: 102078.183

Norte: 93484.890



Fotografía 6 - 68. **3.A.2.b** Pastizal predominante de carretón blanco, entremezclado con vegetación arbustiva (principalmente Chusquea)



Fotografía 6 - 69. **4.A.2.a** Vegetación sobre el drenaje en este punto, compuesta principalmente por: Chusquea Tessellata, Helecho, Canelo de páramo, Encenillo Mortiño, Sauco De Monte, Uvo de Anis.



Fotografía 6 - 70. 4.A.1.a, 4.A.4.a y 4.B.1.a Vegetación al oriente del punto, donde se observa: Higueron , Acacia Japonesa, Corono, Arrayán, Amargoso Rodamonte, Sauco De Monte, Mortiño, Uvo de Anís y pino.



Fotografía 6 - 71. 4.A.3.a, 4.B.1.a y 4.B.2.a Pajonal, chusque y al fondo vegetación de helechos en mezcla con pino y ciprés. Vegetación ubicada al sur del punto.

12. Punto de control N°12

Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 32'24.448"

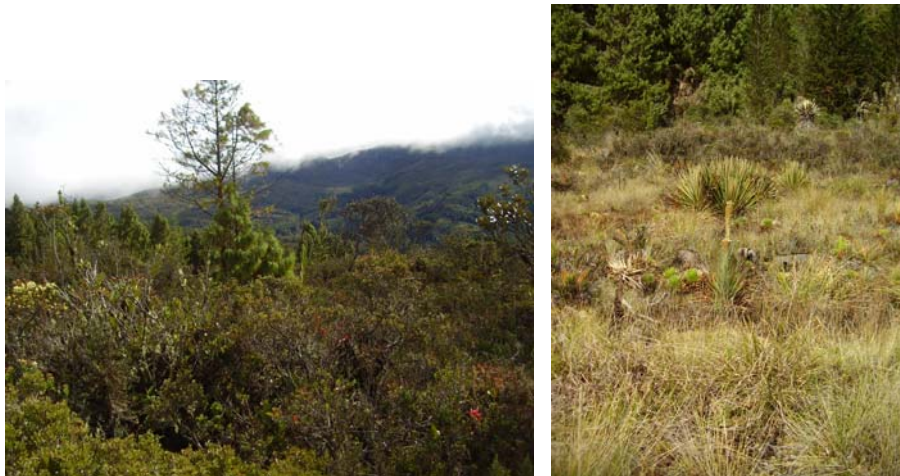
Longitud: 74°03'17.366"

Planas: Este: 102901.577

Norte: 93478.861



Fotografía 6 - 72. **4.B.2.a y 4.A.4.a** Vegetación mezcla de Ciprés con Uva Camaronera, Cruz de Mayo, Angelito, Arrayán, Cadillo, Mortiño, Oraque o San Juan, Amargoso.



Fotografía 6 - 73. **4.A.4.a y 3.C.1.a** Al sur del punto se encuentra frailejón en mezcla con vegetación arbustiva, arbórea (incluyendo pino) y pajonal.

13. Punto de control N°13

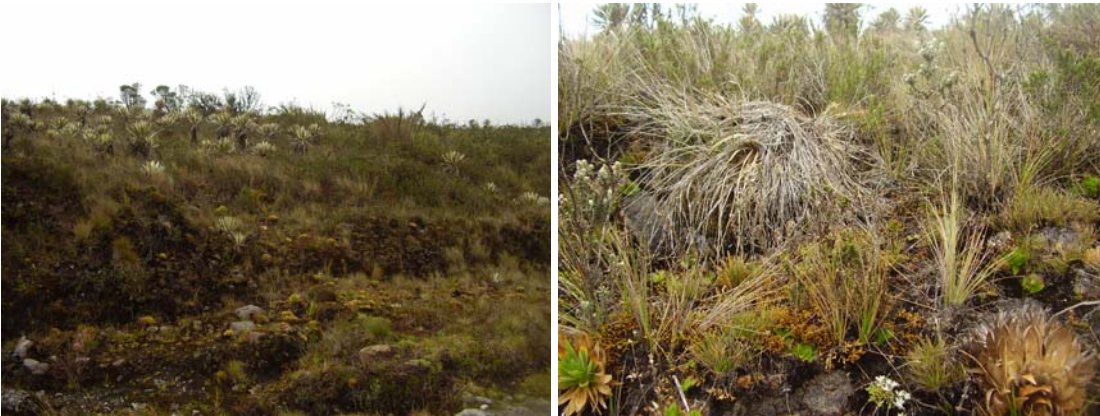
Coordenadas:

Geográficas: Latitud: 4° 31'51.448"

 Longitud: 74°02'56.366"

Planas: Este: 103549.344

 Norte: 92464.884



Fotografía 6 - 74. **3.C.1.a** Vegetación herbácea natural con escasa intervención cuyas especies son: Pajonal, Chite, con predominio de Frailejón (*Espeletia moritziana*).



Fotografía 6 - 75. **3.C.1.a** Vegetación herbácea natural con moderada intervención cuyas especies son: Paja De Ratón (*Calamagrotis Efusa*), Frailejón (*Espelia Grandiflora*), con predominio de Frailejón (*Espeletia moritziana*) en mezcla con vegetación arbustiva y pastizales.

DESCRIPCION DE LAS COBERTURAS

4.A.1.a

Bosque natural de vegetación arbórea densa con especies nativas, muy poco intervenidas, este tipo de bosque es de talla media a achaparrado. Las características del tipo de vegetación que conforman esta categoría son:

- Higueron (*Oreopanax Bogotense*): se localiza a altitudes entre 3000–3300 msnm, en las partes altas, más frías y húmedas en suelos profundos orgánicos, francos a pesados pero bien drenados, en laderas, pies, cañadas y coluvios. Se establece dentro de los matorrales y rastrojos bajos. Aprovecha la formación de pequeños claros para emerger sobre el dosel de los precursores leñosos y sombrearlos, estableciendo firmemente la tardisere, alcanza una altura de 20 m
- Acacia Japonesa: se encuentra en lugares con temperatura comprendida entre 5 y 10 °C, son plantas fijadoras de nitrógeno por lo tanto nitrifican el suelo. Las semillas germinan fácilmente, cuando el banco de semillas en el suelo se expone al sol, o después de un incendio alcanza una altura máxima de 45 m
- Corono (*Xylosma Speculiferum*): rastrojos densos y espinosos y son mucho más grandes las de sombra en cañadas tiene tonos rojizos, espinas en las ramas principales y en el tronco, grandes y ramificadas, especialmente en la base del tronco. se localiza a altitudes de 3000 msnm en suelos pesados en cañadas, colinas, laderas deposicionales, pies de laderas. Necesita de mucha humedad y alcanza hasta 8 m.
- Arrayan (*Mycianthes Leucoxylla*): precursor leñoso de la franja baja del encenillal. Frecuente en las cañadas de las laderas, con olor característico (parecido al de la guayaba verde), las hojas de ambientes húmedos y sombríos pueden variar mucho, siendo lanceoladas, estrechas y largas (5–7 cm). Se ubica a una altitud de 3000 msnm, en Suelos pesados de pie de ladera, colinas y cañadas, su altura esta entre los 6 - 16 m
- Rodamonte (*Escollonia Myrtiloides*): árbol de de hojas apiñadas en ramilletes a lo largo de las ramas. Se ubica en alturas entre 3200–3600 msnm, crece en laderas en ambientes húmedos o en valles húmedos, forma bosques de ladera a continuación y por encima de los de *Weinmannia tomentosa*. En el páramo se intergrada en las facies riparias con los bosques de coloradito (*Polylepis quadrijuga*), su altura es de 15 m
- Sauco De Monte (*Viburnum Triphylum*): arbolito de Hojas simples opuestas elípticas (= 8 cm), verde oscuras se localiza en entre los 2600–3000 msnm, en suelos pesados orgánicos, de drenaje lento a anegados. Crece en cañadas, y pies de ladera. Elemento constante de los rastrojos en dichos suelos. Es una subordinada típica del bosque de alisos (*Alnus acuminata*) junto al raque (*Vallea stipularis*). Frecuentemente asociada a los matorrales, su altura es de 6 m.
- Aliso - *Alnus Acuminata*: conforma casi siempre bosques altos abiertos, o cordones a lo largo de quebradas. Estrictamente heliófila. Soporta

relativamente bien las heladas. En los helechales formados por *Pteridium aquilinum*, donde el drenaje es lento, *A. acuminata* da paso a la conformación de bosques bajos junto con otros componentes como *Cavendishia cordifolia*, *Eupatorium aristeei*, etc. Pueden alcanzar 15m de altura.

4.A.2.a

Bosque natural de vegetación arbustiva poco densa con especies nativas y achaparradas, la característica de las especies más frecuentes en esta categoría son:

- Helecho (*Blechnum Láxense*): tiene frondes con algunas pinas fértiles y estípulas que ayudan a su determinación, de clima frío, en bosques con precipitaciones permanentes o nublados. Absorben agua no sólo por las raíces sino por toda la superficie de su cuerpo. En español también se los conoce como "helechos reviviscentes", porque ante una reducción de la humedad su lámina se deseca, encogiéndose y recurvándose a modo de resistencia, de esta forma resisten la sequía, recuperando su forma cuando la humedad reaparece. Planta baja, que se localiza a alturas entre 3000-3800m
- Canelo de páramo (*Drimys Granadensis*): inductor preclimácico de bosque atmosféricamente muy húmedos de *Weinmannia tomentosa*, Hojas simples alternas oblongo elípticas; haz verde oscuro lustroso, envés casi blanco; se localiza en alturas entre 3100–3300 msnm. De suelos francos a pesados. Se desarrolla mejor en cañadas muy húmedas y frías con suelos franco arenosos, en donde forma el bosque de encenillo y canelo (*Weinmannia tomentosa* + *Drimys granadensis*). Sin embargo, soporta bien suelo ácido y mal drenado. Coloniza en rastrojos bajos y cháscales. Puede alcanzar una altura de 18 m.
- Encenillo (*Weinmannia Tomentosa*): de hojas pequeñas (2–7 cm), opuestas, verde lustroso por el haz. Ramitas rectas delgadas y morenas, que se dividen en los nudos (ligeramente ensanchados) brácteas interpeciolares en las yemas apicales. Las inflorescencias son espigas pequeñas (4–6 cm) blanco–crema, al pasar a fruto se tornan rojizas y al madurar toman color caramelo, con apariencia seca. Ramas en forma de pirámide invertida, con el follaje (verde oscuro oliváceo) concentrado en una sola capa superior. Se ubican el alturas de 2500–3300 msnm, en laderas de suelos arenosos, orgánicos, profundos y bien drenados, ocasionalmente

rocosos. Aunque soporta atmósferas subhúmedas. Su altura oscila entre 15–25 m

- Amargoso (*Ageratina Aristei*): Precursor leñoso del ascenso del bosque en cañadas de subpáramo secundario, codominante del clímax arbustivo del subpáramo en suelos pantanosos, fondos de cañadas, potreros mal drenados. 3000–3300 msnm. Fuerte olor mentolado, alcanza 3.5 m de altura.
- Angelito (*Monochaetum Myrtoideum*): cadena de vegetación poco intervenida, que abarca bosques nublados, bosques parameros y vegetación de páramo. *M. meridense* crece entre los 2.400-3.400 m snm, presenta hojas glabras, de cutícula delgada, con escaso contenido de esclerénquima, parénquima esponjoso y venación laxos, atributos que la caracterizan como una especie mesomórfica.
- (Gaque - *Clusia Multiflora*): árboles en suelos superficiales, hojas simples opuestas, grandes (10–20 cm), muy gruesos y coriáceos, obovados; ápice redondeado, borde ligeramente resolutivo. 2800–3300 msnm. Requiere una curiosa combinación de suelos muy bien drenados (alta exigencia respiratoria de las raíces) pero humedad alta y permanente; circunstancia que se da extensamente en las laderas de suelos ligeros sobre las rocas acuíferas de la Formación Guadalupe. Produce un denso sombreado, lo que la hace una importante dinamizadora de los rastrojos bajos y altos.

4.A.3.a

Bosque natural de vegetación arbustiva predominante de chusque de la clase *Chusquea scandens* Gramineae, moderadamente intervenida, las especies predominantes de esta categoría son:

- Chusque (*Chusquea Scandens* Gramineae): dominante de las series riparias, de cañadas y de laderas atmosféricamente perhúmedas. Similar al bambú; cañas amarillentas delgadas altas y arqueadas, ramificadas y enmarañantes o trepadoras (si hay árboles o peñas cerca). Hojas simples alternas en ramilletes a intervalos sobre los nudos de las cañas. Brácteas con pelos ligeramente urticantes cubriendo los nudos jóvenes. Se localiza en alturas de 2750–3300 msnm.. Exigente en materia orgánica y humedad edáfica. Formadora de la mayoría de los típicos chuscales o carrizales del área. Trepadora facultativa. En suelos húmedos aparece como precursor leñoso, directamente sobre la etapa herbácea, donde su biotipo le permite

excluir por sombreado a todos los pastos y competir gracias a rizomas más robustos. En ambientes menos húmedos aparece subordinada a otras leñosas (principalmente del cordón de Ericáceas). En la zona de estudio se encuentra con alturas hasta de 15m.

- Chusque (Chusquea weberbauerii gramínea): similar al bambú; cañas amarillentas densas, gruesas, altas y ligeramente arqueadas (recuerda a la guadua), poco ramificadas y nunca enmarañantes ni trepadoras. Hojas más largas, delgadas y claras que las de Ch. scandens. Hojas simples alternas en ramilletes a intervalos sobre los nudos de las cañas. Brácteas con pelos ligeramente urticantes cubriendo los nudos jóvenes. Se diferencia fácil de Ch. scandens en que Ch. weberbauerii típicamente forma matones apretados y erectos (como una guadua enana), en vez de las masas caídas y enmarañadas del primero; las cañas son más amarillas y las hojas muy finas y claras. Crece en subpáramo, 3150–3400 msnm. Estrictamente riparia. Exigente en materia orgánica y humedad edáfica.
- Chusque (Chusquea Tessellata): plantas arqueados, escandentes o trepadores, ramificados; entrenudos teretes, sólidos volviéndose fistulosos con la edad, verdes, amarillo, púrpuras, moteados o cubiertos de un exudado ceroso; ramificación de varios tipos, las subsidiarias desarrollándose primero. Hojas del follaje con vaina, lámina delgada o coriácea, inflorescencia de pocas a numerosas flores, en racimos o panículas; alcanza hasta los 20 m de altura y necesita de mucha humedad.

4.A.4.a

Bosque natural de vegetación arbórea densa con especies que exigen gran contenido de humedad y materia orgánica del suelo, poco intervenidas. Las especies predominantes de esta categoría son:

- Cruz de mayo (Laurel Myrsine Parvifolia): tiene gran plasticidad morfológica, forma tapete sobre rocas y focos de erosión, arbustos hemisféricos en potreros degradados, arbustos elevados en laderas de suelos pesados e incluso arbolitos en rastrojos de los mismos lugares. Hojas simples, alternas, serruladas, delgadas, pero a veces grandes, lisas y fuertemente aserradas, amarillentas y con fuerte olor inconfundible a laurel. La planta acumula muchas ramitas secas en pie dentro de la copa y gran cantidad de cera en las hojas y frutos, todo este material altamente inflamable. Se encuentra en alturas entre los 2400–3100 msnm, en suelos pesados, en laderas, donde forma franjas amarillentas a través de los filos, alternándose

con las franjas verdes de otros arbustos y rastrojos que dominan las en las cañadas. Es uno de los arbustos más abundantes de la zona de estudio y se encuentre con alturas entre 4 – 15 m. Se adapta a las condiciones de humedad.

- Mortiño (*Hesperomeles Goudotiana*): hojas simples alternas aserradas ovadas, pequeñas; se encuentra en zonas con alturas entre 2900–3300 msnm, en suelos francos a pesados en pendientes moderadas. Exigente en humedad y materia orgánica del suelo. Frecuente en matorrales de subpáramo. Aparece aislado o en greges colonizando potreros en zonas frías y húmedas. Alcanza una altura de hasta 6m en la zona de estudio.

- Uvo de Anís (*Cavendishia Cordifolia*): árbol de Hojas simples alternas coriáceas trinervias, de forma y tamaño muy variable. Hojas jóvenes formando penachos erectos rojos. Inflorescencias característicamente forradas por brácteas rosadas imbricadas. Corteza rozada–rojiza escamosa. Crecimiento reclinado. Se localiza en alturas entre los 2700–3200 msnm, en suelos pesados pero bien drenados; laderas, escarpes y cañadas. Necesita de amplio rango de humedad atmosférica. Soporta condiciones de cuchilla. Predomina en claros de bosque muy cercanos al subpáramo, pocas veces se encuentra en bosques de ladera del encenillal, puede hallarse en la transición a subpáramo; en bosques bajos está acompañada por *Myrsine guianensis*, *W. tomentosa*. Se encuentra con alturas entre 5–16 m.

- Agraz (*Vaccinium Floribundum*): Mortiño, Arándano, Uva del monte, Abia, planta de clima frío, temperatura entre 6 y 16°C del bosque húmedo montano, en una altitud hasta de 3800 msnm, en suelos ricos en materia orgánica. (PH 4.0 – 4.5), Tiene una altura entre 40-50cm y contenido de humedad entre el 60 y 80%

4.B.1.a

Bosque plantado con vegetación arbórea localizada en zonas de páramo y subpáramo en suelos predominante con musgo para las plantaciones de pino de

talla elevada (30m de altura), pero zonas cerca de las construcciones se encuentra en mezcla con eucaliptos. Hay dos especies predominantes de pino, siendo el radiata el que se halla en combinación con el eucalipto, la descripción de las especies predominantes es:

- Como el musgo se encuentra bajo el pino el cual cubre gran parte de la cobertura aérea en la imagen, el musgo se incluyo en esta categoría.
- Musgo- *Sphagnum Magellanicum*: Los miembros de este género pueden retener grandes cantidades de agua dentro de sus células. algunas especies pueden retener más de 20 veces su peso seco en agua. El *Sphagnum* consiste en un tallo principal con racimos de ramas, por lo general de 2 a tres ramas que se extienden y de dos a cuatro ramas colgantes. La parte de arriba de la planta, o *capitulum* contiene racimos de ramas jóvenes.
- El Pino de Monterey, Radiata o Insigne (*Pinus radiata*) árbol de talla media a elevada, de aproximadamente 30 metros de altura. En la zona de estudio se encuentra de variada altura y diámetro de su tronco, siendo 50 centímetros el máximo diámetro. Tiene ramas inferiores extendidas. Agujas de unos 15 cm de longitud agrupadas en tres. Estróbilos ovoides. Es una especie muy adaptable, altamente tolerante a muy diversos tipo de suelo siendo capaz incluso de desarrollarse en paredes de roca viva casi verticales; debido a su alta valencia ecológica puede vivir en un amplio rango de alturas, como se presenta en la zona de estudio, siendo poco exigente en la demanda de humedad, y exposición al sol. Este clase de pino forma una capa de espinas limitando debajo de sus copas otro tipo de vegetación; se encuentra generalmente en la zona de estudio rodeado de vegetación arbustiva.
- El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) se desarrolla en montañas hasta altitudes de 3000 m. El pino silvestre se encuentra cultivado ampliamente y tiene una altura promedio en la zona de estudio de 30 m por unos 5 metros de circunferencia. Su copa es de forma cónica de joven para luego de adulto pasar a ser irregular, ancha y deprimida, de joven presenta un tronco vestido que de adulto pasa a ser desnudo se adapta a todo tipo de suelo menos a los anegados pero sí a los húmedos, mientras más fértiles y profundos mayor es el desarrollo, en la zona de estudio generalmente se halla en zonas con mucho musgo. No vive mucho tiempo en competencia con otras especies que lo superen en altura. Existen numerosas clasificaciones dentro de esta clase de pino desde el punto de vista del autor, pero se puede considerar dentro de estos a una especie predominante en la zona de estudio el pinus patula.

- *Eucalyptus Globulus*: Árbol siempreverde, con la corteza blanquecina que se desprende en tiras en los ejemplares adultos. Copa piramidal, alta. Tallos jóvenes, blanquecino-pubescentes. Hojas juveniles de color gris-azulado, de 8-15 cm de longitud y 4-8 cm de anchura. Las adultas alternas, pecioladas, con la base cuneada, linear-lanceoladas, de 15-25 cm de longitud, con el ápice acuminado. La textura es algo coriácea y son de color verde oscuro. Alcanza los 60m de altura. Estos árboles están adaptados a elevadas alturas sobre el nivel del mar, la máxima altura en la que se encuentra es 3000 msnm.

4.B.2.a

Bosque plantado de vegetación arbórea predominante de ciprés cuya especie predominante es: Ciprés (*Cupressus Lusitania-Sempervirens*), se presenta en muchas ocasiones con pino silvestre (*Pinus sylvestris* en variedad pátula).

- El ciprés común (*Cupressus sempervirens*) es un árbol perennifolio de gran longevidad, las hojas se presentan en ramillos con forma de escama entre 2 y 5 milímetros de longitud. Tiene un follaje denso de color verde oscuro, forma ramas finas, más o menos cilíndricas o tetragonales de color verde oscuro mate. Flores: Las masculinas son cilíndricas de tono amarillento entre 3 y 5 milímetros de. Las femeninas forman conjuntos de pequeñas piñas o conos de color gris verdoso de 2 a 3 cm de diámetro, con 8 a 14 escamas, que al madurar adquieren un aspecto leñoso, La semilla se encuentra en los conos. De tronco recto, presentes en la zona de estudio con troncos en hasta 80 cm aproximadamente de diámetro. Corteza delgada, más o menos lisa, de color grisáceo en árboles jóvenes que con la edad cambiará a un pardo oscuro y grietas longitudinales.

Se encuentra bajo dos formas naturales: 1.Horizontal (*Cupressus sempervirens* f. *sempervirens*, *sempervirens* f. *horizontalis*): con ramificación extendida y aspecto de cedro o de pino. 2. Piramidal (*Cupressus sempervirens* f. *pyramidalis*, *sempervirens* f. *stricta*): con porte columnar; es la forma más extendida en la zona de estudio.

Tiene alturas entre 25 y 30 metros. Se encuentra en zonas no muy húmedas y soporta temperaturas de hasta -10°C

3.C.1.a

Vegetación herbácea de páramo natural con moderada a escasa intervención cuyas especies son: Paja De Ratón (*Calamagrotis Efusa*), Pajonal, Frailejón (*Espelia Grandiflora*) Con predominio de Frailejón (*Espeletia moritziana*).

- Paja De Ratón (*Calamagrotis Efusa*): Habitan en grandes alturas en el trópico. Estas hierbas perennes comúnmente adventicias, poseen hojas estrechas y sin pubescencia, formando penachos. Las lígulas suelen ser romas. Las inflorescencias forman una panícula, en algunas especies de color rojizo. Vegetan principalmente en terrenos húmedos
- Frailejón (*Espelia Grandiflora*): el frailejón es una planta de la familia de las compuestas, enana en la que también se incluyen plantas como las margaritas, el girasol y el tabacote morado del páramo, este tipo de vegetación solo se encuentra en el páramo a mas de 3000 msnm y ocupa un espacio considerable en la zona de estudio.
- Frailejón (*Espeletia moritziana*): es la especie más común en el páramo, de la cuenca alta del río San Cristóbal, esta otra especie alcanza hasta los 2m de altura, cuyas flores salen en forma de cabezuelas solitarias. Este tipo de frailejón se halla acompañado de pajonales en zonas húmedas.
- Cardon (*Puya Nitida*) Especie acompañante de la formación media clara, en la zona de paramos que conforman un pajonal – frailejonal típico. Alcanza una altura de 0.3 - 0.5 m

3.A.2.b

Vegetación herbácea de pastizales en pequeñas áreas, tanto en la zona urbana como rural, algunos de ellos con manejo agronómico; las especies predominantes son: Carreton Blanco (*Trifolium Repens*), Falsa Poa (*Holcus Lanatus*), Pasto de Olor (*Anthoxanthus Odoratum*). Esdta cobertura se estable tanto en areas planas como onduladas, dentro diferentes niveles de altitud, generalmente en condiciones de mucha humedad. En la zona rural los pastos están enmalezados con gramíneas, herbáceas y arbustivas especialmente en el páramo. Una de las especies predominantes en los pastizales es (otra especie es el retamo espinoso):

- Chilco - *Baccharis Latifolia*: arbusto de hojas simples alternas lanceoladas (= 20 cm) aserradas trinervias glabras, verde claras. 2500–2950 msnm. Suelos pesados, deteriorados pero con algo de materia orgánica y humedad; pendientes suaves a moderadas; ocasional en cañadas.

Frecuente riparia, ruderal, en potreros compactados y en terrazas de canteras. Abunda en lugares de suelos húmedos conformando manchones en pastizales abiertos y en focos de erosión (en micrositos favorables). Puede alcanzar 3m de altura.

6.b.1.a

Tierras Eriales o suelo desnudo son aquellas zonas que no presentan cobertura vegetal debido a las canteras o minas o por afloramientos rocosos.

Canteras, están relacionadas con la acción de extracción de piedras, pedregones, arena, recebo. También se encuentra en suelo desnudo por agentes naturales o erosionados.

1.A

Construcciones urbanas definidas como obras civiles que el hombre ha realizado, incluye vías, todo tipo de obras civiles para usos residencial, comercial e industrial, para esta categorización no se especifico el tipo de construcción, está conformando una sola unidad, en el estudio a escalas más detalladas se individualizan los tipos de obras civiles.

Como producto de esta actividad se presenta el Plano: Cobertura y Uso de Suelo.

6.6.3 Análisis multitemporal para la cuenca alta del Río San Cristóbal

En el análisis multitemporal se elaboraron mapas temáticos de uso y cobertura del suelo desde el año 1.938 con el objetivo de poseer una herramienta de comparación de uso y cobertura del suelo a través del tiempo. A partir del estudio multitemporal se estimaron las pérdidas de cobertura vegetal principalmente por la construcción de nuevos asentamientos que posteriormente han venido formando parte de la estructura urbana de Bogotá.

Esta actividad consistio en realizar una interpretación visual, a través de fotografías aéreas.

Después de elaborar el mapa de uso de cobertura del área ocupada por la cuenca alta del río San Cristóbal con una imagen SPOT 4, multiespectral con cuatro bandas, capturada el 24 de agosto de 2006; el cual es la referencia para el uso y

cobertura actual. Se hizo la interpretación mediante fotogrametría análoga con un estereoscopio de espejos, de fotografías aéreas desde el año 1.938 hasta el año 1.993.






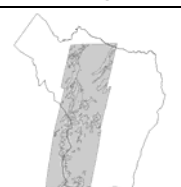

Se georreferenciaron los planos resultado del proceso de interpretación y se digitalizaron.

Debido a las diferentes escalas de las fotografías aéreas el nivel de detalle alcanzado para cada una de las interpretaciones variaba mucho por lo cual se estimaron diversas categorías de tipo de cobertura, congruentes para todos los años obteniendo la siguiente leyenda:

CONVENCIONES		
	4.A.1	Bosque Natural Arbóreo
	4.A.2	Bosque Natural Arbustiva
	4.B	Bosque Plantado Arbóreo
	3.C	Vegetación Herbácea Páramo
	3.A	Pastizales y Lotes
	6.B	Suelo Desnudo
	1.A	Construcción Civil
	CUL	Cultivos
		Límite Zona de Estudio

La distribución del área abarcada por las fotografías aéreas según la zona de estudio y la descripción de las mismas se esquematiza a continuación:

N° Fotografía aérea (Fuente: IGAC)	Fecha	Escala	Vuelo	Área cubierta
---------------------------------------	-------	--------	-------	---------------

N° Fotografía aérea (Fuente: IGAC)	Fecha	Escala	Vuelo	Área cubierta
844 a 845 y 208 a 211	1.938	1:22.000	C35	
6 a 11	1.945	1:20.000	C415	
24 a 25	1.953	1:10.000	C673	
2137 a 2143	1.963	1:20.000	C1063	
79 a 82	1.973	1:10.000	C1447	
70 a 80 y 80 a 94	1.984	1:9.000	C2161	
174 a 178	1.987	1:18.000	C2323	


N° Fotografía aérea (Fuente: IGAC)	Fecha	Escala	Vuelo	Área cubierta
64 a 66	1.993	1:50.000	C2521	

Tabla 6-9. Distribución fotografías aéreas para el análisis multitemporal

La cartografía temática obtenida representa categorías de uso y cobertura, permitiendo representar esquemáticamente áreas con cambios representativos, tales como los siguientes:

Para 1.938 se observa una notable diferencia de área construida con respecto a la cobertura actual, es así como en la parte sur del área urbana actual antes existían pastizales además había presencia de algunos cultivos, al costado norte del área actualmente construida para 1938 existía vegetación natural arbustiva. Es de resaltar también el cambio de cobertura vegetal natural arbustiva y arbórea por bosques plantados.

Para 1945 se comienza a observar pequeñas construcciones en la parte norte de la zona de estudio, respecto a la vegetación natural presente es poco el cambio con respecto a 1.938.

Para 1953 empieza a consolidarse el área urbana en lo que hoy en día son los barrios San Cristóbal Sur y Montecarlo, las construcciones estaban rodeadas de vegetación natural y en lo que hoy en día es el barrio Aguas Claras se encontraban pastizales y vegetación natural arbustiva.

Para 1963 es menor la cantidad de bosque plantado a cambio de esta vegetación se encuentra vegetación arbórea natural.

Para 1.973 existían bosques plantados y pastizales en donde hoy se ubican los barrios de Laureles, Aguas Claras y Tibaque Urbano. Hay una notable diferencia para los alrededores de esta zona, en la actualidad posee vegetación plantada que para 1.973 era vegetación natural arbustiva y arbórea.

Para 1.984 se encuentra consolidado los barrios de Montecarlo y Tibaque Urbano, ha incrementado el número de bosques plantados y pastizales con respecto al año de 1963.

Para 1.987 el barrio Molinos de Oriente está consolidado como es actualmente y la cobertura natural de la época ha sido modificada por bosque plantado.

Para 1.993 la diferencia mas notoria con el uso y cobertura actual es el aumento de construcciones aledañas al consolidado urbano hacia el sector sur occidente.

Consideraciones finales

Se concentro el interés en sitios determinados como lo es la zona urbana, considerando la complejidad de su crecimiento caracterizado por un aumento hacia la zona sur occidental, invadiendo bosques y vegetación natural.

En las partes más altas de la cuenca no se presentaron cambios considerables, la vegetación natural se ha mantenido pero en las laderas de las montañas se ha visto un cambio sustancial de vegetación natural por bosques plantados.

Han aumentado considerablemente el suelo desnudo, en la parte occidental de la zona de estudio.

Debido a que tan solo se hizo una interpretación visual directamente sobre las fotografías aéreas y a las diferentes escalas de las mismas, se obtuvieron planos de uso y cobertura esquemáticos, que permitieran diferenciar categorías generales no al mismo detalle del mapa de uso y cobertura actual.

El cubrimiento de las fotografías áreas, no es el mismo para la zona de estudio a través de el tiempo, pero con todas las fotografías de todos los años se cubrió toda la zona de estudio.

El resultado de este proceso se presenta en Anexo C -9.

6.6.4 Análisis multitemporal de la cobertura

En términos generales existen dos zonas en las que la cobertura vegetal ha sufrido cambios significativos a lo largo de los últimos 70 años: El sector del Cerro La Teta y la zona hoy ocupada por los barrios Manantial, Laureles, La Cecilia, Aguas Claras y Gran Colombia.

En el sector del Cerro La Teta la cobertura vegetal ha sido intervenida tanto desfavorable como favorablemente a lo largo del tiempo, sin embargo, es relevante mencionar que la referenciación de la mayoría de los procesos

morfodinámicos en el sector, coinciden con periodos de tiempo en los que la cobertura vegetal aparece afectada negativamente.

El otro sector, hoy ocupado por los barrios antes mencionados, aparece intervenido antrópicamente a través del reemplazo por pastizales de una zona cubierta hacia 1945 por bosque natural arbóreo, y sin recuperación desde entonces. El sector muestra una gran concentración de procesos morfodinámicos principalmente entre 1953 y 1973, y un desarrollo urbano aproximadamente desde 1984.

Por lo anterior, no es claro que el desarrollo urbano haya sido el factor detonante de los procesos morfodinámicos sucedidos en el pasado, pero dadas las evidencias de la actividad actual de tales procesos, es evidente que la intervención antrópica si constituye un factor contribuyente de gran peso en esta situación.

Periodo		Observaciones Cobertura	Observaciones Procesos Morfodinámicos
Año Fotografías	Año Fotografías		
1938	1945	<p>Aparición de pastizales y bosque natural arbustivo donde antes aparecía bosque natural arbóreo, en el sector del Cerro de La Teta</p> <p>Recuperación de la zona donde actualmente se encuentran localizados los Barrios Gran Colombia, Laureles, Manila, La Cecilia y Aguas Claras, pasando de ser zonas de pastizales a zonas de bosque natural arbóreo.</p> <p>Aparición de pastizales en el sector de lo que hoy se conoce como Vitelma, donde antes aparecía bosque natural arbóreo y bosque natural arbustivo</p>	<p>No existen procesos morfodinámicos en la zona en la que se presentó el cambio en la cobertura</p> <p>Correspondiente a las fotografías de 1938, el mapa de procesos morfodinámicos muestra la existencia de zonas de extracción que no se evidencian en las fotografías de 1945.</p> <p>En las Fotografías de 1945 se muestran un par de flujos coincidentes con la zona intervenida</p>
1945	1953	<p>Aparición nuevamente de pastizales en el sector de Aguas Claras, Laureles, Gran Colombia, Manila y La Cecilia, en sectores antes ocupados por bosque natural arbóreo</p> <p>Aparición de zonas construidas en la parte baja de la zona de estudio.</p> <p>Recuperación parcial de los pastizales de Vitelma, mostrando sectores de bosque natural arbustivo y bosque natural plantado</p>	<p>En las Fotografías de 1953 se muestran coincidentemente zonas de extracción somera y zonas de extracción con taludes fuertes.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados.</p>
1945	1963	<p>El sector Sur Occidental (Cerro La Teta) y centro Occidental del área de estudio, muestra una gran intervención pasando de bosque natural arbóreo a bosque natural arbustivo.</p> <p>Aparición de un sector de suelo desnudo cerca del Cerro La</p>	<p>En las Fotografías de 1963 se evidencian múltiples flujos activos y cicatrizados en la zona en la que se intervino la cobertura vegetal</p> <p>Se localizan cárcavas en el mismo sector en el que</p>

Periodo		Observaciones Cobertura	Observaciones Procesos Morfodinámicos
Año Fotografías	Año Fotografías		
		<p>Teta.</p> <p>Recuperación parcial de los pastizales de Vitelma pasando por sectores a ser bosque natural arbustivo.</p> <p>Recuperación parcial en el costado Sur de la zona de estudio pasando de pastizales a bosque natural arbóreo</p>	<p>la cobertura muestra suelo desnudo.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados.</p>
1945	1973	Degradación del sector centro occidental de la zona de estudio pasando de bosque natural arbóreo a pastizales, bosque natural plantado, bosque natural arbustivo e incluso la aparición de zonas pobladas y zonas de suelo desnudo.	Las Fotografías de 1973 muestran múltiples deslizamientos activos, coincidentes con la zona de intervención de la cobertura vegetal.
1963	1984	<p>Recuperación de las zonas degradadas cerca del Cerro de La Teta, pasando de Bosque natural arbustivo a bosque natural arbóreo y desapareciendo la zona de suelo desnudo presente en la Fotografía del año 1963.</p> <p>Recuperación del sector del Cerro El Aguanoso pasando de bosque natural arbustivo a bosque natural arbóreo.</p>	<p>El mapa de procesos morfodinámicos muestra múltiples flujos en su mayoría cicatrizados.</p> <p>Se cartografiaron dos flujos cicatrizados</p>
1963	1987	Degradación de una franja hacia el costado Sur y Sur Oriental de la zona de estudio, pasando de bosque natural arbóreo a bosque natural arbustivo	Se cartografiaron algunos deslizamientos activos y zonas de erosión en sectores de baja pendiente, coincidentes con la zona de degradación de la cobertura vegetal.
1984	1987	Aparición de zonas pobladas en donde aparecían zonas de pastizales en el sector de los actuales Barrios Manila y Laureles	No se cartografiaron procesos morfodinámicos nuevos en este periodo y en esta zona

Periodo		Observaciones Cobertura	Observaciones Procesos Morfodinámicos
Año Fotografías	Año Fotografías		
1987	1993	<p>Recuperación del sector Sur y Sur Oriental de la zona de zona de estudio mostrando en 1993 zonas de bosque natural arbóreo donde aparecía en 1987 bosque natural arbustivo.</p> <p>Consolidación de la zona urbana en la parte baja de la zona de estudio.</p> <p>Degradación de la parte media baja de la zona de estudio (El Delirio, El Aguanoso), pasando de bosque natural arbóreo a bosque natral arbustivo.</p> <p>Recuperación del sector de Vitelma mediante la aparición de sectores de bosque natural plantado.</p> <p>Ampliación del bosque natural arbustivo sobre zonas de bosque natural arbóreo en el sector del Cerro de La Teta.</p>	<p>En las Fotografías de 1993, se cartografió un flujo cicatrizado en el mismo sector.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados en el sector, en este periodo de tiempo.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados en el sector, en este periodo de tiempo.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados en el sector, en este periodo de tiempo.</p> <p>Sin procesos morfodinámicos cartografiados en el sector, en este periodo de tiempo.</p>

Tabla 6-10. Observaciones análisis multitemporal coberturas

CAPITULO 7

SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE PROCESOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL

En el presente capítulo se presentan los resultados de la modelación de los diferentes procesos que ocurren dentro de la cuenca durante los eventos de lluvia. Entre estos procesos se incluyen los de erosión, los de inestabilidad y los flujos a lo largo de los cauces. El marco teórico de los modelos aplicados se presentó en el Capítulo 4-Marco Teórico y los procedimientos se explicaron en el Capítulo 5-Metodología.

7.1 Evaluación del aporte de sedimentos por procesos erosivos

Siguiendo la metodología planteada en el Capítulo 5 se obtuvieron los valores para cada uno de los parámetros que intervienen en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo como sigue:

7.1.1 Factor de erosividad, R

Suponiendo una distribución homogénea de la lluvia en la cuenca y a partir de los hietogramas definidos para cada tormenta y para cada periodo de retorno, se calculó el valor del factor de erosividad de la lluvia, obteniendo los resultados mostrados en las Tablas la 7-1 a la 7-7. Estos valores fueron verificados con los obtenidos para la cuenca del Río Tunjuelito, dando el mismo orden de magnitud, de manera que se consideraron válidos.

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, Ir (mm/h)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)		
0,00	0,00				
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	
0,67	2,85	0,33	20,00	8,55	5,8210
1,00	3,55	0,33	20,00	10,65	7,5521
1,33	6,20	0,33	20,00	18,60	14,5258
1,67	6,15	0,33	20,00	18,45	14,3894
2,00	2,40	0,33	20,00	7,20	4,7425
2,33	1,80	0,33	20,00	5,40	3,3567
2,67	4,50	0,33	20,00	13,50	9,9855
3,00	7,80	0,33	20,00	23,40	18,9665
3,33	3,22	0,33	20,00	9,67	6,7410
3,67	1,14	0,33	20,00	3,43	1,9324
4,00	0,07	0,33	20,00	0,22	0,0477
4,33	0,81	0,33	20,00	2,42	1,2532
4,67	0,48	0,33	20,00	1,44	0,6499
5,00	5,86	0,33	20,00	17,57	13,5947
5,33	2,36	0,33	20,00	7,09	4,6540
5,67	1,02	0,33	20,00	3,06	1,6782
6,00	1,74	0,33	20,00	5,22	3,2220
6,33	2,64	0,33	20,00	7,92	5,3140

Σ =	54,60
-----	-------

Σ E =	118,4264 (Kg * m) / m ²
I 30 =	15,90 mm / hr
R =	52,710 (Ft*Ton/Acre)*(Pulg/h ora)

Tabla 7-1. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 5 años.

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, Ir (mm/h)	er (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	3,41	0,33	20,00	10,24	0,1649	7,2105
1,00	4,25	0,33	20,00	12,76	0,1797	9,3425
1,33	7,43	0,33	20,00	22,28	0,2215	17,9171
1,67	7,37	0,33	20,00	22,10	0,2208	17,7495
2,00	2,87	0,33	20,00	8,62	0,1543	5,8811
2,33	2,16	0,33	20,00	6,47	0,1389	4,1711
2,67	5,39	0,33	20,00	16,17	0,1970	12,3367
3,00	9,34	0,33	20,00	28,03	0,2386	23,3699
3,33	3,86	0,33	20,00	11,59	0,1730	8,3439
3,67	1,37	0,33	20,00	4,11	0,1200	2,4102
4,00	0,09	0,33	20,00	0,27	0,0840	0,0634
4,33	0,97	0,33	20,00	2,90	0,1094	1,5685
4,67	0,57	0,33	20,00	1,72	0,0985	0,8186
5,00	7,02	0,33	20,00	21,05	0,2171	16,7732
5,33	2,83	0,33	20,00	8,49	0,1534	5,7720
5,67	1,22	0,33	20,00	3,67	0,1162	2,0954
6,00	2,08	0,33	20,00	6,25	0,1373	4,0047
6,33	3,16	0,33	20,00	9,49	0,1601	6,5857

Σ =	65,40
-----	-------

Σ E =	146,4139 (Kg * m) / m ²
I 30 =	19,05 mm / hr
R =	78,057 (Ft*Ton/Acre)*(Pulg/ hora)

Tabla 7-2. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 10 años.

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, I _r (mm/h)	er (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	4,10	0,33	20,00	12,31	0,1772	8,9574
1,00	5,11	0,33	20,00	15,33	0,1930	11,5913
1,33	8,93	0,33	20,00	26,78	0,2353	22,1676
1,67	8,85	0,33	20,00	26,56	0,2347	21,9611
2,00	3,45	0,33	20,00	10,36	0,1656	7,3136
2,33	2,59	0,33	20,00	7,77	0,1484	5,1971
2,67	6,48	0,33	20,00	19,43	0,2110	15,2870
3,00	11,23	0,33	20,00	33,69	0,2513	28,8847
3,33	4,64	0,33	20,00	13,93	0,1859	10,3579
3,67	1,65	0,33	20,00	4,94	0,1269	3,0137
4,00	0,11	0,33	20,00	0,32	0,0846	0,0839
4,33	1,16	0,33	20,00	3,48	0,1146	1,9676
4,67	0,69	0,33	20,00	2,07	0,1018	1,0329
5,00	8,43	0,33	20,00	25,30	0,2311	20,7578
5,33	3,40	0,33	20,00	10,20	0,1646	7,1786
5,67	1,47	0,33	20,00	4,41	0,1225	2,6226
6,00	2,50	0,33	20,00	7,51	0,1466	4,9910
6,33	3,80	0,33	20,00	11,40	0,1719	8,1850

Σ =	78,60
-----	-------

Σ E =	181,5508 (Kg * m) / m ²
I ₃₀ =	22,89 mm / hr
R =	116,324 (Ft*Ton/Acre)*(Pulg/ hora)

Tabla 7-3. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 25 años.

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, Ir (mm/h)	er (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	4,60	0,33	20,00	13,81	0,1853	10,2565
1,00	5,73	0,33	20,00	17,20	0,2017	13,2625
1,33	10,02	0,33	20,00	30,05	0,2435	25,3212
1,67	9,93	0,33	20,00	29,80	0,2430	25,0859
2,00	3,88	0,33	20,00	11,63	0,1733	8,3795
2,33	2,91	0,33	20,00	8,72	0,1550	5,9613
2,67	7,27	0,33	20,00	21,81	0,2198	17,4779
3,00	12,60	0,33	20,00	37,80	0,2585	32,9738
3,33	5,21	0,33	20,00	15,63	0,1944	11,8550
3,67	1,85	0,33	20,00	5,54	0,1317	3,4641
4,00	0,12	0,33	20,00	0,36	0,0850	0,0996
4,33	1,30	0,33	20,00	3,91	0,1183	2,2659
4,67	0,78	0,33	20,00	2,33	0,1041	1,1936
5,00	9,46	0,33	20,00	28,39	0,2395	23,7146
5,33	3,82	0,33	20,00	11,45	0,1722	8,2254
5,67	1,65	0,33	20,00	4,94	0,1269	3,0164
6,00	2,81	0,33	20,00	8,43	0,1530	5,7258
6,33	4,26	0,33	20,00	12,79	0,1799	9,3746

Σ =	88,20
-----	-------

Σ E =	207,6535 (Kg * m) / m ²
I 30 =	25,68 mm / hr
R =	149,299 (Ft*Ton/Acre)*(Pulg/h ora)

Tabla 7-4. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 50 años

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, I _r (mm/h)	er (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	4,82	0,33	20,00	14,45	0,1886	10,8152
1,00	6,00	0,33	20,00	18,00	0,2051	13,9809
1,33	10,48	0,33	20,00	31,44	0,2466	26,6757
1,67	10,39	0,33	20,00	31,18	0,2461	26,4280
2,00	4,06	0,33	20,00	12,17	0,1764	8,8381
2,33	3,04	0,33	20,00	9,13	0,1577	6,2903
2,67	7,61	0,33	20,00	22,82	0,2233	18,4193
3,00	13,18	0,33	20,00	39,55	0,2611	34,7295
3,33	5,45	0,33	20,00	16,35	0,1978	12,4986
3,67	1,93	0,33	20,00	5,80	0,1338	3,6581
4,00	0,13	0,33	20,00	0,38	0,0851	0,1064
4,33	1,36	0,33	20,00	4,09	0,1198	2,3945
4,67	0,81	0,33	20,00	2,43	0,1051	1,2629
5,00	9,90	0,33	20,00	29,70	0,2427	24,9846
5,33	3,99	0,33	20,00	11,98	0,1753	8,6757
5,67	1,72	0,33	20,00	5,17	0,1288	3,1860
6,00	2,94	0,33	20,00	8,82	0,1557	6,0421
6,33	4,46	0,33	20,00	13,39	0,1831	9,8863

Σ =	92,28
-----	-------

Σ E =	218,8722 (Kg * m) / m ²
I ₃₀ =	26,87 mm / hr
R =	164,645 (Ft *Ton)/ (Acre*Pulg)

Tabla 7-5. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 70 años

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, Ir (mm/h)	er (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	5,03	0,33	20,00	15,09	0,1918	11,3774
1,00	6,27	0,33	20,00	18,80	0,2084	14,7038
1,33	10,94	0,33	20,00	32,83	0,2495	28,0381
1,67	10,85	0,33	20,00	32,56	0,2490	27,7780
2,00	4,24	0,33	20,00	12,71	0,1794	9,2997
2,33	3,18	0,33	20,00	9,53	0,1603	6,6215
2,67	7,94	0,33	20,00	23,83	0,2266	19,3665
3,00	13,77	0,33	20,00	41,30	0,2635	36,4952
3,33	5,69	0,33	20,00	17,07	0,2011	13,1464
3,67	2,02	0,33	20,00	6,06	0,1357	3,8536
4,00	0,13	0,33	20,00	0,40	0,0853	0,1133
4,33	1,42	0,33	20,00	4,27	0,1213	2,5242
4,67	0,85	0,33	20,00	2,54	0,1061	1,3330
5,00	10,34	0,33	20,00	31,01	0,2457	26,2621
5,33	4,17	0,33	20,00	12,51	0,1783	9,1290
5,67	1,80	0,33	20,00	5,40	0,1306	3,3570
6,00	3,07	0,33	20,00	9,21	0,1583	6,3606
6,33	4,66	0,33	20,00	13,98	0,1862	10,4013

Σ =	96,36
-----	-------

Σ E =	230,1606 (Kg * m) / m ²
I 30 =	28,06 mm / hr
R =	180,791 (Ft *Ton)/ (Acre*Pulg)

Tabla 7-6. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 90 años

Tiempo (horas)	Lluvia (mm)	Δ Tiempo		Intensidad, I _r (mm/h)	e _r (1) MJ/(Ha*mm)	E (1) (Kg * m) / m ²
		(Horas)	(Minutos)			
0,00	0,00					
0,33	0,00	0,33	20,00	0,00	0,0812	
0,67	5,14	0,33	20,00	15,41	0,1934	11,6599
1,00	6,40	0,33	20,00	19,19	0,2100	15,0669
1,33	11,17	0,33	20,00	33,52	0,2509	28,7221
1,67	11,08	0,33	20,00	33,25	0,2504	28,4558
2,00	4,33	0,33	20,00	12,98	0,1809	9,5316
2,33	3,24	0,33	20,00	9,73	0,1616	6,7880
2,67	8,11	0,33	20,00	24,33	0,2281	19,8422
3,00	14,06	0,33	20,00	42,17	0,2646	37,3817
3,33	5,81	0,33	20,00	17,44	0,2027	13,4718
3,67	2,06	0,33	20,00	6,18	0,1367	3,9519
4,00	0,14	0,33	20,00	0,41	0,0854	0,1168
4,33	1,45	0,33	20,00	4,36	0,1221	2,5894
4,67	0,87	0,33	20,00	2,60	0,1066	1,3682
5,00	10,56	0,33	20,00	31,67	0,2471	26,9036
5,33	4,26	0,33	20,00	12,77	0,1798	9,3567
5,67	1,84	0,33	20,00	5,51	0,1315	3,4429
6,00	3,14	0,33	20,00	9,41	0,1595	6,5206
6,33	4,76	0,33	20,00	14,27	0,1877	10,6600

Σ =	98,40
-----	-------

Σ E =	235,8300 (Kg * m) / m ²
I ₃₀ =	28,65 mm / hr
R =	189,167 (Ft *Ton)/ (Acre*Pulg)

Tabla 7-7. Cálculo del factor de erosividad de la lluvia para un periodo de retorno de 100 años

La Figura 7-1 muestra los valores consolidados del factor de erosividad y su variación en función del periodo de retorno.

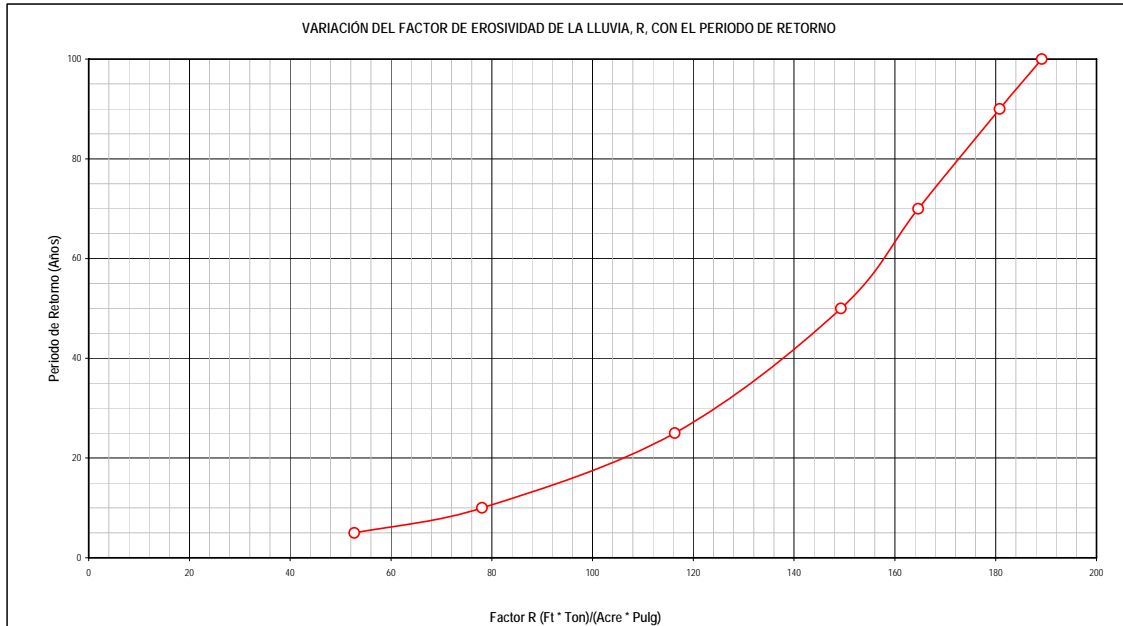


Figura 7-1. Variación del factor de erosividad de la lluvia en función de los periodos de retorno

Como era de esperarse, el valor del factor R aumenta con el periodo de retorno, ya que la intensidad de la tormenta de análisis definida para cada uno de ellos, igualmente aumenta.

7.1.2 Factor de erodabilidad del suelo, K

Tomando como base el Mapa de Unidades de Suelo del Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, producido por la CAR en el 2006, se identificaron tres unidades de suelo en la Cuenca Media y Alta del Río San Cristóbal:

- Suelos sin influencia de ceniza volcánica y desaturados
- Suelos con influencia de ceniza volcánica
- Zona urbana

A través de las muestras del estrato superficial, obtenidas en los mismos sitios donde se realizó la exploración geotécnica (Ver Capítulo 6), éstas fueron clasificadas de acuerdo con la unidad de suelo a la que pertenecían y luego de realizar los ensayos de granulometría, hidrometría y contenidos de materia orgánica, se calculó el valor del factor de erodabilidad del suelo con la ecuación propuesta por Weschmeier y Smith, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7-8.

Unidad de Suelo	K
Suelos con influencia de ceniza volcánica	0,122
Suelos sin influencia de ceniza volcánica	0,069
Zonas urbanas	0,019

Tabla 7-8. Factores de erodabilidad para cada una de las unidades de suelo

7.1.3 Factores topográficos L y S

El factor LS es el de más detalle dentro del análisis ya que se realizó para cada celda de 10 metros de lado, haciendo uso del modelo digital del terreno y la función de acumulación de flujo (Flow Accumulation).

Los valores del factor LS obtenidos, oscilan entre 0 y 164.76, mostrando la distribución de frecuencias presentada en la Figura 7-2.

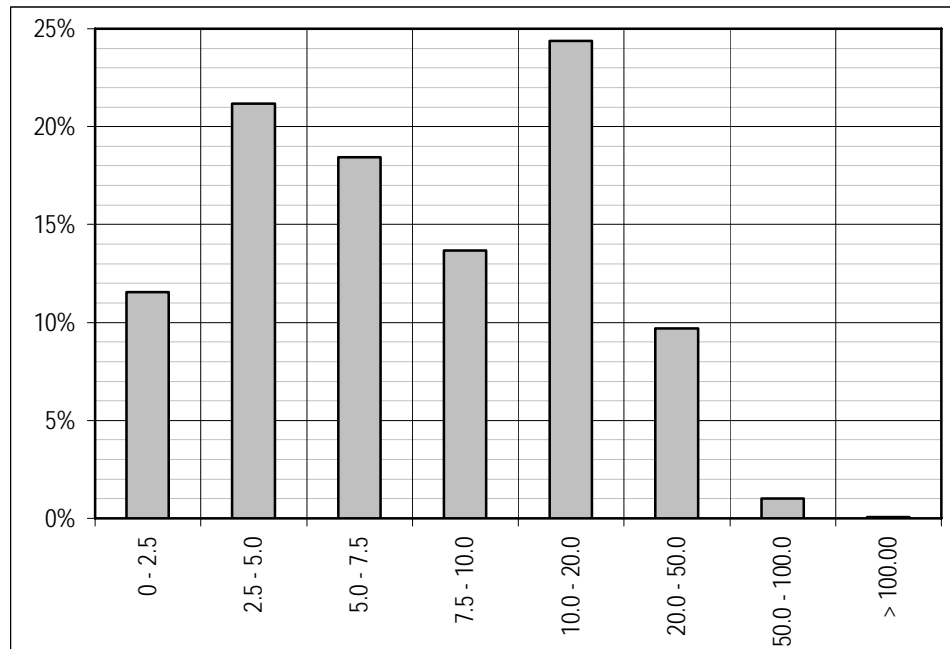


Figura 7-2. Distribución de frecuencias del factor LS para toda la cuenca

7.1.4 Estimación del factor de cobertura, C

Cada una de las unidades de cobertura identificadas mediante la interpretación de la imagen de satélite fue sometida a un control de campo, capturando la información necesaria para estimar el valor del factor C a través de las tablas incluidas en el capítulo 5.

El resultado de los valores del factor de cobertura se muestran en la Tabla 7-9.

<i>Descripción</i>		<i>Factor C</i>
4.A.1.a	Vegetación arbórea densa con especies nativas, muy poco intervenida, de las partes altas, más frías y húmedas. De suelos profundos orgánicos, francos a pesados pero bien drenados. Este tipo de bosque se ubica entre los 2500 -3300 msnm en laderas, pies, ca	0,013
4.A.2.a	Vegetación arbustiva poco densa con especies nativas en donde existan precipitaciones permanentes y mucha nubosidad, con escasa intervención. Se encuentra entre los 2500–3300 msnm, en laderas de suelos arenosos, orgánicos, profundos y bien drenados, ocasi	0,013
4.A.3.a	Vegetación arbustiva predominante de chusque, ubicada entre 2750–3300 msnm.	0,013
4.A.4.a	Vegetación arbórea densa con especies que exigen gran contenido de humedad y materia orgánica del suelo. De pendientes suaves en suelos pesados pero bien drenados. Puede hallarse en la transición a subpáramo. La altura promedio que alcanza este tipo de v	0,013
4.B.1.a	Vegetación arbórea localizada en zonas de páramo y subpáramo con predominio de pino de talla elevada 30m de altura, pero zonas cerca de las construcciones se encuentra en mezcla con eucaliptos. La especie predominante de pino es: Pino de Monterey, Radiata	0,040
4.B.2.a	Vegetación arbórea plantada de ciprés y pino que soportan tanto los suelos ácidos como los básicos. Estos árboles soportan muy bien el calor y la sequía, no así los grandes fríos (temperaturas inferiores a -10 °C) rechaza los suelos muy húmedos o arenosos	0,013
3.C.1.a	Vegetación herbácea natural con moderada a escasa intervención, con predominio de Frailejón que puede alcanzar hasta los 2m de altura y se localiza en alturas superiores a los 2800 msnm.	0,012
3.A.2.b	Pastos en pequeñas áreas, tanto en la zona urbana como rural, algunos de ellos con manejo agronómico	0,012
6.B.1.a	Zonas que no presentan cobertura vegetal	1,000
1.A	Zonas Urbanas	0,470

Tabla 7-9. Factor C para cada una de las unidades de cobertura

De los valores asignados a cada una de las unidades de cobertura, cabe resaltar el dado a la unidad definida como “6.B.1.a: Tierras Eriales”, la cual agrupa los sectores de canteras abandonadas o activas, entre otros, ya que como se verá más adelante, tal valoración influye determinadamente sobre el aporte de sedimentos.

7.1.5 Factor de prácticas de protección, P

Dentro de la cuenca que demarca el área de estudio, no se evidenció ningún tipo de práctica que busque el control de erosión, en buena parte porque las zonas desprotegidas o denudas ocupan un muy bajo porcentaje.

Para efectos de la modelación se asumió el valor de P como 1.0 en toda la zona de estudio, de tal forma que no se alteró el resultado obtenido por la multiplicación de los cinco factores restantes.

7.1.6 Producción de sedimentos por erosión

Mediante la multiplicación de todos los factores mencionados en los párrafos precedentes para cada una de las celdas en las que se discretizó geográficamente la cuenca y a través de las herramientas del sistema de información geográfica, se obtuvo el valor de pérdida total de suelo por celda.

Se totalizó el valor de pérdida de suelo para cada subcuenca mediante la suma de los valores correspondientes de las celdas. Este valor fue afectado por un coeficiente de producción de sedimentos, dado que se debe considerar que no todo el volumen generado por erosión se convierte en sedimentos.

Los valores de los coeficientes de producción de sedimentos fueron calculados a partir de la información recopilada en el Estudio “Saneamiento Ambiental y Control de Crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo”, hallando valores comprendidos entre 0.12 y 0.27, tal como se observa en la Tabla 7-18.

La Figura 7-3. muestra la curva obtenida de los datos recopilados en el estudio mencionado arriba y la ecuación de regresión que más se ajustó.

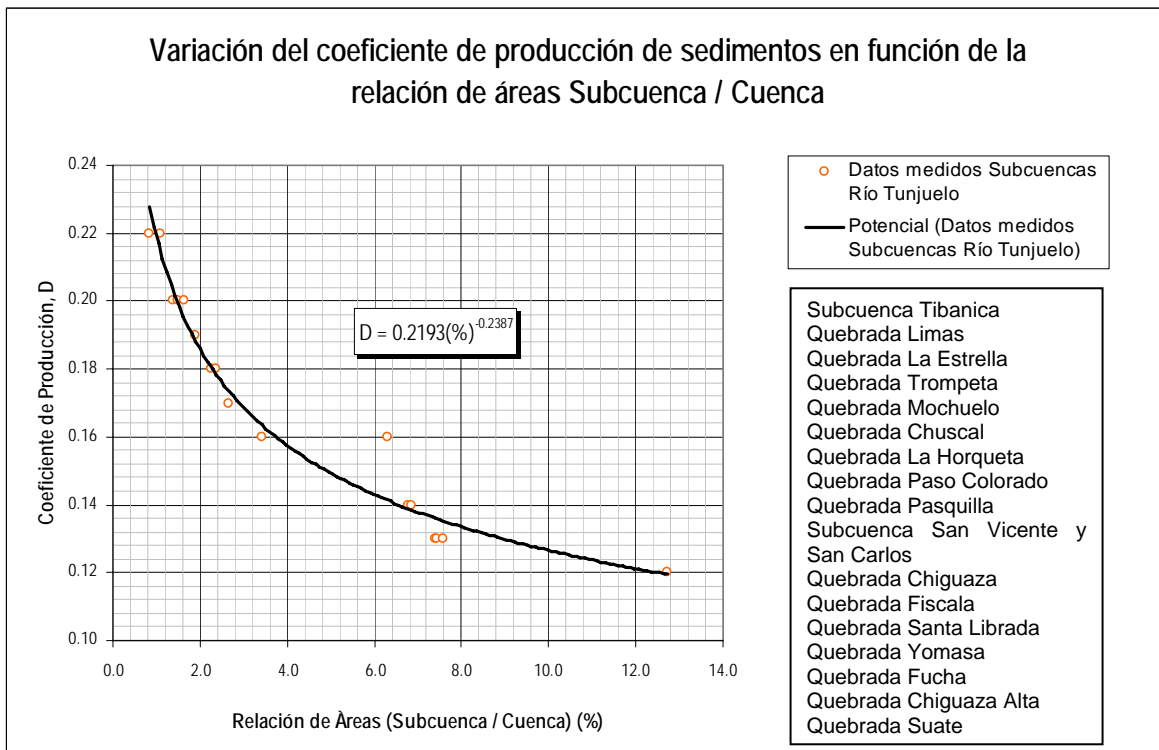


Figura 7-3. Gráfica creada a partir de los datos recopilados en el Estudio "Saneamiento Ambiental y Control de Crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo"

La Figura 7-3. Variación del coeficiente de producción de sedimentos en función de la relación de áreas Subcuenca / Cuenca – Cuenca Río Tunjuelo

A partir de la ecuación mostrada en la Figura 7-3. y de la relación de áreas entre subcuenca y cuenca para el caso específico del río San Cristóbal, se calcularon los coeficientes de producción para cada una de ellas.

Finalmente, los resultados de producción de sedimentos, consolidados a nivel de subcuencas, se muestran en la Tabla 7-20. Las memorias de cálculo que dieron origen a esta tabla se presentan en el Anexo D-1

7.2 Evaluación del aporte de sedimentos por procesos de inestabilidad de las bancas

Para la selección de las secciones que se utilizaron en el análisis de estabilidad, se tuvo en cuenta en primer lugar que fueran representativas de las unidades geológicas de la zona y por otra parte que estuvieran localizadas en zonas

afectadas por condiciones particulares (procesos de remoción en masa, entregas de agua al cauce principal, zonas de inundación).

Para este propósito, se aprovechó el diseño del trabajo de topografía en el cual se establecieron 9 secciones de topografía detallada para caracterizar las márgenes del río.

Se tomaron cuatro (4) secciones a lo largo del eje del río, cuya ubicación fue: K 8+401 (En el parque de San Cristóbal a 250 m aguas arriba del puente de la carrera 6ª, en la llegada del Canal de San Blas), esta sección se considera típica del sector donde el río transcurre sobre el cono aluvial; K6+037 (350 m aguas debajo de la antigua planta de tratamiento de Vitelma, en la llegada de la Quebrada La Pichosa), sección que define el tramo crítico en la parte baja de Aguas Claras, el cual es una zona inestable, esta sección es representativa de la transición entre una sección con cauce en roca y otra en cono aluvial; K 5+657 aguas arriba de la confluencia de la quebrada La Pichosa, esta sección es representativa de la parte baja de la cuenca del río San Cristóbal; K 3+057 (Cerca de la confluencia del río con la Quebrada La Osa) y K 1+517 (Confluencia del Río San Cristóbal con la Quebrada La Colorada), estas dos secciones se consideran representativas de la parte alta de la cuenca del río San Cristóbal.

- La primera sección K8+401, fue determinada en una zona caracterizada por el cambio brusco de pendiente del río, el cual fue compensado en años anteriores con la construcción de estructuras de disipación de energía. Esta característica del cauce generó las pendientes y llanuras de inundación que se ven hoy en día. Además, 200 metros aguas arriba la quebrada Ramajal (canal San Blas) entrega sus aguas al río San Cristóbal.
- Las secciones K6+037 y K5+657 se tomaron de una zona que presenta características particulares como procesos de remoción en masa (barrio Gran Colombia), en la zona en donde termina el área de reserva del acueducto y comienza la zona de desarrollo urbano. En esta zona entrega sus aguas la quebrada La Pichosa al río San Cristóbal.
- La sección 4; K3+057 se tomó en la zona de confluencia de la quebrada La Uputa con el río San Cristóbal (en este punto se le conoce como Palo Blanco).
- Por último la sección 5; K1+517 se tomó en una zona de bajo caudal y pendiente suave, con llanuras de inundación poco pronunciadas.

Las longitudes aferentes de las secciones de análisis para el cálculo de volúmenes de sedimentos que aportan las bancas del río San Cristóbal, se determinaron con base en el tipo de sección que se presenta a lo largo del río como se describió anteriormente. La longitud aferente se tomó desde la sección hacia aguas arriba, tal como se presenta en la Figura 7-4.

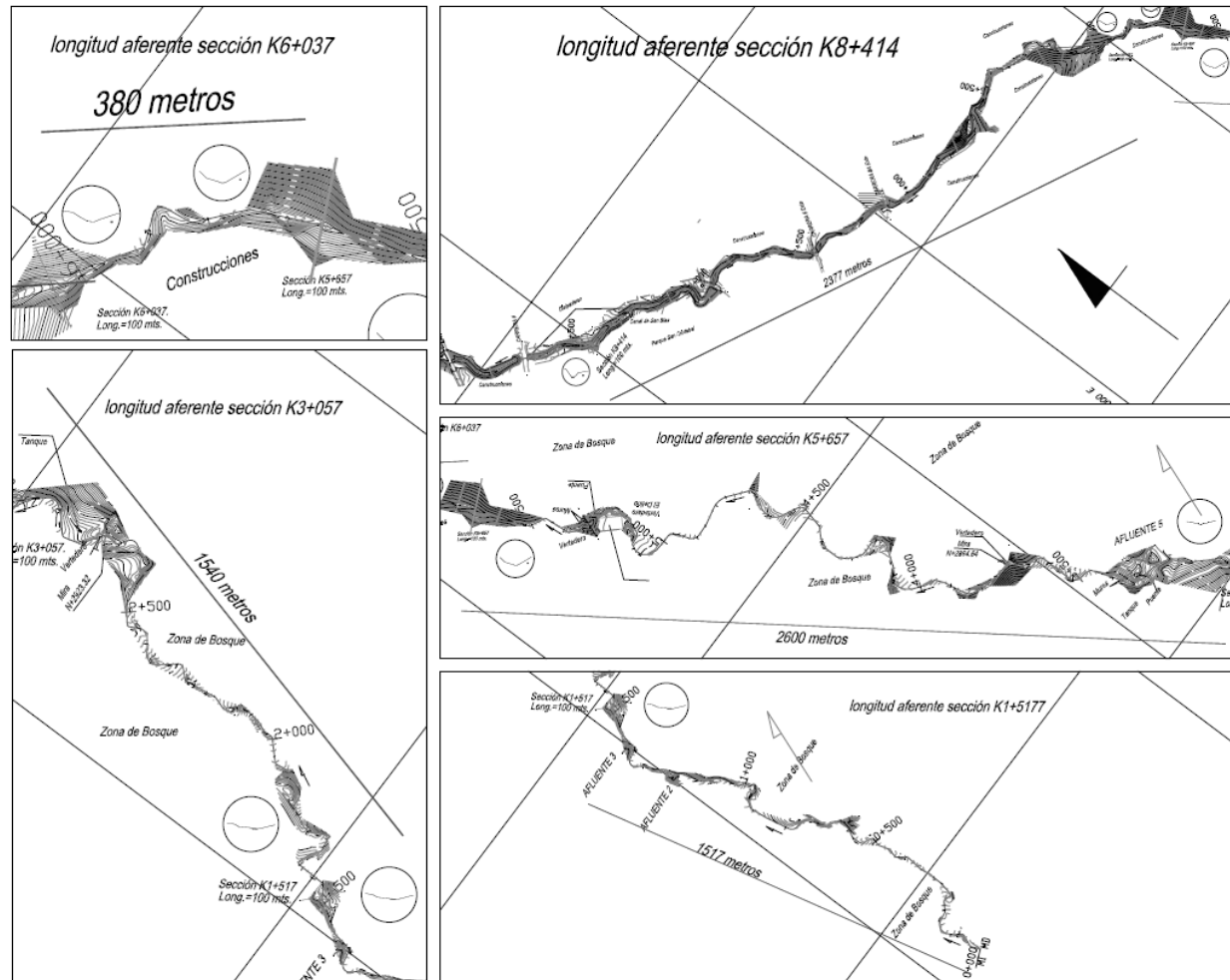


Figura 7-4. Longitudes aferentes a las secciones

Sección	Longitud aguas arriba
k8+414	2377
K6+037	380
K5+675	2600
K3+057	1540
K1+517	1517

Tabla 7-10. Longitudes aferentes a las secciones de análisis.

Utilizando la topografía y los parámetros geotécnicos obtenidos de la exploración y ensayos de laboratorio, se realizó el análisis de estabilidad de las márgenes del río con el fin de establecer cuales serian las condiciones de inestabilidad y los volúmenes de aporte por deslizamientos y socavación que se generarían en estos sitios.

Establecidas las secciones típicas se procedió a realizar los respectivos análisis de estabilidad, para cada una de las márgenes del río, donde potencialmente se podrían presentar procesos de remoción en masa. En particular, es sobre la margen izquierda del Río San Cristóbal donde se generan este tipo de procesos, sobre el suelo de origen coluvial. Las márgenes se modelaron utilizando como herramienta el programa SLIDE v. 5.0, que permite, además de análisis estático, realizar análisis pseudoestático, con las aceleraciones obtenidas de la evaluación de amenaza sísmica.

Para cada una de las secciones se generaron escenarios en función de la geometría de la ladera, nivel de socavación del lecho del río y de las aceleraciones obtenidas para cinco periodos de retorno de la Amenaza Sísmica.

En cuanto a la geometría se modelaron las márgenes sobre las cuales potencialmente se podrían generar procesos de inestabilidad, en cada una de las secciones seleccionadas.

Como niveles de socavación para el modelo se tomaron profundidades de 0.0 m, -1.0 m, -2.0 m y -3.0 m, los cuales definieron la cantidad de escenarios a analizar.

La Tabla 7-11 presenta los valores de socavación local esperadas en las secciones de análisis de estabilidad de las bancas. Estos valores se obtuvieron con la ecuación de Inglis (1940) como se explicó anteriormente.

D50 (mm)	f
7.35	4.77

Profundidad de socavación (m)

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
	1.51	1.64	1.79	1.87	1.90	1.94	1.96
K 6+037	1.70	1.89	1.97	2.03	2.07	2.10	2.13
K 5+657	0.72	0.79	0.86	0.91	0.93	0.94	0.95
K 3+057	0.50	0.58	0.66	0.71	0.74	0.76	0.76
K 1+517	1.18	1.30	1.40	1.49	1.52	1.56	1.57

Profundidad (m)

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
K 8+401	0.84	0.92	1.02	1.09	1.12	1.15	1.16
K 6+037	0.66	0.77	0.77	0.78	0.79	0.81	0.83
K 5+657	0.54	0.61	0.68	0.73	0.75	0.76	0.77
K 3+057	0.17	0.20	0.23	0.25	0.26	0.27	0.27
K 1+517	1.26	1.41	1.56	1.67	1.71	1.74	1.76

Área (m²)

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
K 8+401	5.15	5.85	6.77	7.44	7.74	8.04	8.15
K 6+037	6.43	7.98	7.98	8.12	8.26	8.55	8.84
K 5+657	1.16	1.37	1.59	1.75	1.81	1.84	1.88
K 3+057	0.27	0.37	0.49	0.57	0.62	0.67	0.67
K 1+517	6.58	7.91	9.34	10.45	10.86	11.18	11.39

Velocidad (m/s)

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
K 8+401	3.75	4.27	4.76	4.98	5.01	5.10	5.18
K 6+037	4.27	4.78	5.38	5.78	6.01	6.09	6.20
K 5+657	1.78	2.04	2.27	2.42	2.47	2.51	2.56
K 3+057	2.60	2.92	3.28	3.52	3.62	3.70	3.75
K 1+517	1.40	1.55	1.67	1.79	1.84	1.90	1.92

Caudal (m³/s)

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
K 8+401	19.31	24.96	32.21	37.06	38.78	41.00	42.19
K 6+037	27.47	38.13	42.92	46.94	49.64	52.07	54.82
K 5+657	2.07	2.79	3.60	4.23	4.47	4.62	4.81
K 3+057	0.70	1.08	1.61	2.01	2.24	2.48	2.51
K 1+517	9.21	12.26	15.60	18.71	19.98	21.24	21.87

Tabla 7-11. Profundidades de socavación en los diferentes sitios de interés.

En cuanto a la parte sísmica fueron se utilizaron los valores de aceleración para una condición estática de aceleración $a_0 = 0g$, luego, al adicionar la aceleración sísmica, en función de los diferentes periodos de retorno obtenidos de la evaluación de amenaza sísmica, así: para un periodo de retorno de 10 años $a_{10}=0.063g$, 50 años $a_{50}=0.107g$, 100 años $a_{100}=0.142g$, 475 años $a_{475}=0.28g$ y 1000 años $a_{1000}=0.378g$.

Combinadas las condiciones especificadas, se seleccionaron las áreas de superficies de falla que generaron factores de seguridad menor a 1.0, y luego se identificó y seleccionó la que mayor valor de área se generaba.

Una vez obtenida el área de la cuña inestable en cada una de las secciones, fue necesario ponderar la dimensión longitudinal, a partir de la relación existente entre las longitudes de los deslizamientos obtenidos del inventario de procesos, respecto a la longitud total del Río, obteniendo que este valor es de 0.065, el cual fue utilizado en la estimación de los volúmenes de aporte por inestabilidad de las márgenes del río.

Como resultado de la modelación realizada, se obtuvieron los siguientes valores de factor de seguridad y área de la geometría de la superficie de falla.

PROFUNDIDAD DE SOCAVACION	PERIODO DE RETORNO SISMO	FACTOR DE SEGURIDAD	AREA CUÑA
0	0	1.31	0.00
	10	1.12	0.00
	50	1.01	0.00
	100	0.95	1.50
	475	0.73	1.50
	1000	0.62	1.50
-1	0	1.29	0.00
	10	1.10	0.00
	50	1.00	0.00
	100	0.93	3.00
	475	0.71	3.00
	1000	0.61	3.00
-2	0	0.87	1.01
	10	0.92	1.01
	50	0.95	1.20
	100	0.93	32.97
	475	0.72	32.97
	1000	0.60	51.71

Tabla 7-12. Seccion K1+517.

PROFUNDIDAD DE SOCAVACION	PERIODO DE RETORNO SISMO	FACTOR DE SEGURIDAD	AREA CUÑA
0	0	1.43	0.00
	10	1.17	0.00
	50	1.04	0.00
	100	0.95	129.84
	475	0.69	129.84
	1000	0.58	129.84
-1	0	1.43	0.00
	10	1.16	0.00
	50	1.02	0.00
	100	0.95	105.71
	475	0.70	105.03
	1000	0.58	105.03
-2	0	0.80	0.78
	10	0.80	0.78
	50	0.80	0.78
	100	0.80	0.78
	475	0.65	85.04
	1000	0.54	85.04
-3	0	1.00	0.00
	10	0.94	0.87
	50	0.83	0.87
	100	0.76	0.87
	475	0.69	87.34
	1000	0.57	87.34

Tabla 7-13. Seccion K3+057.

PROFUNDIDAD DE SOCAVACION	PERIODO DE RETORNO SISMO	FACTOR DE SEGURIDAD	AREA CUÑA
0	0	0.858	57.14
	10	0.784	57.20
	50	0.736	57.20
	100	0.701	34.69
	475	0.558	61.11
	1000	0.489	61.11
-1	0	0.855	44.21
	10	0.766	44.21
	50	0.585	44.21
	100	0.654	44.21
	475	0.528	44.21
	1000	0.489	44.21
-2	0	0.778	110.01
	10	0.704	110.01
	50	0.660	110.01
	100	0.627	110.01
	475	0.519	110.01
	1000	0.452	296.92
-3	0	0.781	105.98
	10	0.707	105.98
	50	0.662	105.98
	100	0.629	105.98
	475	0.520	105.98
	1000	0.450	213.67

Tabla 7-14. Seccion K6+037.

PROFUNDIDAD DE SOCAVACION	PERIODO DE RETORNO SISMO	FACTOR DE SEGURIDAD	AREA CUÑA
0	0	0.90	21.60
	10	0.81	21.60
	50	0.76	21.60
	100	0.71	21.60
	475	0.57	21.60
-1	1000	0.49	21.60
	0	0.61	67.77
	10	0.89	58.92
	50	0.86	47.72
	100	0.79	71.31
-2	475	0.71	71.31
	1000	0.52	71.31
	0	0.93	65.42
	10	0.84	65.42
	50	0.78	65.42
-3	100	0.74	65.42
	475	0.60	65.42
	1000	0.52	65.42
	0	0.87	68.69
	10	0.79	68.69
	50	0.73	68.69
	100	0.69	68.69
	475	0.56	68.69
	1000	0.48	68.69

Tabla 7-15. Sección K8+401.

En general se observa que para las secciones de la parte alta del Río San Cristóbal, K 1+517 y K3+057 no se generan en condiciones estáticas y sin alterar el nivel del lecho del río procesos de inestabilidad en el modelamiento, luego de tener, una socavación mayor a -2.0 m, esto cambia y más si se adicionan en los análisis los valores de las aceleraciones sísmicas. Anexo D - 2.

En la mayoría de los sitios analizados a lo largo del río los materiales que componen sus márgenes, presentan susceptibilidad a ser inestables, tanto en condiciones estáticas como al adicionar el efecto sísmico.

Como primer criterio de selección para la obtención de los volúmenes fue la comparación de los valores de socavación hidráulica, obtenidos a partir de la ecuación de Inglis (1949), de donde se obtuvo para diferentes periodos de retorno y en las diferentes secciones, las siguientes profundidades, expresadas en metros:

Sitio	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 70	Tr = 90	Tr = 100
K 1+500	0.50	0.58	0.66	0.71	0.74	0.76	0.76
K 3+000	1.18	1.30	1.40	1.49	1.52	1.56	1.57
K 5+675	1.51	1.64	1.79	1.87	1.90	1.94	1.96
K 8+000	0.72	0.79	0.86	0.91	0.93	0.94	0.95

Tabla 7-16. Profundidades para diferentes periodos de retorno y diferentes secciones.

Al comparar con las profundidades utilizadas en lo modelos se seleccionaron aquellas que de acuerdo a los niveles de socavación hidráulica se pudieran presentar, obteniendo finalmente los siguientes valores de volúmenes sedimentos por inestabilidad de las márgenes del río.

PERIODO DE RETORNO DEL SISMO (Años)	ABSCISA			
	K1+500	K 3+000	K +5+675	K 8+500
0	0.00	76.20	7687.01	15888.75
10	0.00	76.20	7687.01	13814.09
50	0.00	76.20	7687.01	11188.19
100	292.50	76.20	7687.01	16720.15
475	292.50	8291.09	7687.01	16720.15
1000	292.50	8291.09	7687.01	16720.15

Tabla 7-17. Volúmenes de sedimentos por inestabilidad de las margenes del río.

Para los diferentes escenarios se obtienen los valores totales que se presentan en la Tabla 7-18.

PERIODO DE RETORNO LLUVIA (Años)	PERIODO DE RETORNO SISMO (Años)											
	0 Años				10				50			
	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal
5	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
10	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
25	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
50	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
70	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
90	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2
100	0.0	76.2	7687.0	15888.0	0.0	76.2	7687.0	13814.0	0.0	76.2	7687.0	11188.2

PERIODO DE RETORNO LLUVIA (Años)	PERIODO DE RETORNO SISMO (Años)											
	100				475				1000			
	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal	Colorada	Osa	Pichosa	Ramajal
5	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
10	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
25	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
50	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
70	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
90	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2
100	292.5	76.2	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2	292.5	8291.1	7687.0	16720.2

Tabla 7-18. Volúmenes totales potencialmente inestables, Condición dinámica (m³)

7.3 Evaluación del aporte de sedimentos por procesos de inestabilidad de las laderas

Ya en el capítulo 4 se presentó el marco teórico general del modelo matemático que permite la evaluación de las condiciones de estabilidad de una ladera, sin embargo, de manera particular, a continuación se detalla el procedimiento de cálculo de los volúmenes de sedimentos en condición estática y pseudo estática:

Suponiendo un mecanismo de falla planar justificado por lo observado en campo y por el inventario de procesos morfodinámicos, se obtuvieron las ecuaciones 7-1, 7-2 y 7-3, a partir de diagramas de cuerpo libre equivalentes a los presentados en las secciones 4.8 y 4.9, esto para plantear el factor de seguridad como una función de los parámetros geotécnicos tales como la cohesión efectiva, el ángulo de resistencia interna y el peso unitario; las fuerzas actuantes y resistentes dadas por la presencia de vegetación: sobrecarga y cohesión por enraizamiento; la geometría del talud (inclinación o pendiente promedio del sector analizado) y la posición de la superficie de falla y del nivel freático.

$$F.S. = \frac{(C_s + C_r) + \left[(\gamma * Z * \cos^2 \beta) * \left(1 - k * \tan \beta - \frac{\gamma_w * m}{\gamma} + \frac{q_o}{\gamma * Z} \right) * \tan \phi \right]}{(\gamma * Z * \cos^2 \beta) * \left(\tan \beta + k + \frac{q_o}{\gamma * Z} * \tan \beta \right)} \quad [7-1]$$

$$F.S. = \frac{(C_s + C_r) + \left[(\gamma * Z * \cos^2 \beta) * \left(1 - \frac{\gamma_w * m}{\gamma} + \frac{q_o}{\gamma * Z} \right) * \tan \phi \right]}{(\gamma * Z * \cos^2 \beta) * \left(\tan \beta \left(1 + \frac{q_o}{\gamma * Z} \right) \right)} \quad [7-2]$$

$$K_c = \frac{(C_s + C_r)}{(\gamma * Z * \cos^2 \beta) * (1 + \tan \beta * \tan \phi)} + \frac{\tan \phi}{1 + \tan \beta * \tan \phi} \left(1 - \frac{\gamma_w * m}{\gamma} - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} + \frac{q_o}{\gamma * Z} \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right) \right) \quad [7-3]$$

$F.S.$ = Factor de Seguridad

K_c = Aceleración Crítica

C_s = Cohesión efectiva del suelo en la superficie de falla

γ = Peso Unitario del suelo existente sobre la superficie de falla

ϕ = Ángulo de resistencia interna del suelo en la superficie de falla

γ_w = Peso Unitario del agua

q_o = Sobrecarga impuesta por la vegetación

Cr = Cohesión dada por el enraizamiento

β = Inclinación o pendiente promedio en el sector de análisis

Z = Profundidad de la superficie de falla

Z_w = Altura del nivel freático medida desde la superficie de falla

m = Relación $\frac{Z}{Z_w}$

k = Aceleración en condición pseudo estática

Los valores de los parámetros geotécnicos: cohesión efectiva, ángulo de resistencia interna y peso unitario, fueron asignados para cada unidad superficial, considerando tanto los resultados de los ensayos de laboratorio sobre las muestras extraídas durante el programa de exploración del subsuelo como los resultados obtenidos en otros estudios.

Los valores de sobrecarga por vegetación, profundidad de enraizamiento y cohesión por enraizamiento, fueron asignados para cada una de las unidades de cobertura vegetal, haciendo extensivo el valor de la especie predominante, esto a partir de información obtenida de estudios previos realizados por otros autores.

La pendiente o inclinación promedio del sector de análisis fue tomada del modelo digital del terreno.

Por lo observado en campo durante el inventario de procesos morfodinámicos, se asume que la superficie de falla coincide con la profundidad de infiltración, la cual a su vez es función de la precipitación y de las condiciones del subsuelo. Para este caso se realizaron análisis separados para cada escenario de lluvia, por lo que una vez calculada la profundidad de infiltración para un escenario dado, la profundidad de la superficie de falla queda determinada por las condiciones del subsuelo, definidas mediante la zonificación por unidades superficiales.

De esta manera, se tiene que los insumos para el análisis de estabilidad general, son:

- Mapa de unidades superficiales con los atributos de cohesión efectiva, ángulo de fricción interna, peso unitario y profundidad de infiltración. Como

se mencionó arriba, esta última es igual a la profundidad de la superficie de falla y es obtenida de manera previa mediante la metodología propuesta por Pradel y Raad (1993).

- Mapa de cobertura vegetal con los atributos de profundidad de enraizamiento, cohesión por enraizamiento y sobrecarga.
- Modelo digital del terreno.

El mecanismo de falla se produce por descenso del frente húmedo durante una lluvia determinada, de esta manera, la superficie del nivel freático debe suponerse a nivel del terreno natural y la profundidad de la superficie de falla es igual a la altura de la tabla de agua.

Así, para cada celda de 10 m por 10 m, discretización dada en función del nivel de detalle del estudio, se tienen valores de cada uno de los parámetros que determinan el factor de seguridad, y se puede calcular su valor, inicialmente en condición estática a partir de la Ecuación 7-2.

Las celdas con un factor de seguridad inferior a 1.0 se convierten en zonas inestables, y para ellas se calcula el volumen inestable como el producto del área de la celda por la profundidad de la superficie de falla.

Para el análisis de estabilidad en condición dinámica se procede como sigue:

A partir de la Ecuación 7-3, para cada celda se calcula el valor de la aceleración crítica, entendida como la aceleración capaz de convertir el factor de seguridad, en condición estática, en 1.0.

La aceleración esperada para cada uno de los escenarios es comparada con la aceleración crítica. Las celdas donde la aceleración crítica es inferior a la aceleración esperada, se convierten en celdas inestables para ese escenario y se procede a calcular el volumen inestable, de manera idéntica a la expuesta cuando se trató el análisis estático.

Al final, se tienen volúmenes inestables para cada uno de los escenarios: combinaciones de carga estática y dinámica con cada una de las precipitaciones definidas para cada uno de los periodos de retorno.

Hasta el momento se han obtenido los volúmenes inestables, ahora, para cada una de las 42 combinaciones dadas por los siete periodos de retorno de lluvia y los cinco escenarios de sismo, más el escenario en condición estática, se hallan los volúmenes de entrega de sedimentos, afectando el volumen inestable por los coeficientes de producción de sedimentos, utilizando la metodología general expuesta en el capítulo 5.

En la Tabla 7-19 se presenta el resultado más crítico, correspondiente a la combinación del periodo de retorno de 100 años para lluvia y 1000 años para sismo, y en el Anexo D-3 se compilan los resultados obtenidos para las demás combinaciones. Los mapas que muestran la distribución espacial del Factor de Seguridad se muestran en el Anexo D-4.

VOLUMEN DE SEDIMENTOS (m^3)

Escenario TR = 100 años (Lluvia) y 1000 años (Sismo)

Microcuenca		Volúmenes de Entrega afectados por los coeficientes de producción		Volúmenes de Entrega afectados por los coeficientes de producción y por el número de tormentas efectivas	
		Curva Inferior	Curva Superior	Curva Inferior	Curva Superior
(1)		(2)	(3)	(4)	(5)
1	San Cristóbal	96189	750771	3103	24218
2	El Triangulo	15	144	0	5
3	La Upata	89219	737859	2878	23802
4	La Colorada	436	4058	14	131
5	PB-2	3776	38564	122	1244
6	Piedra Redonda	27312	247931	881	7998
7	La Fotoga	13534	115843	437	3737
8	PB-1	3722	37078	120	1196
9	Palo Blanco Alta Derecha	36327	300506	1172	9694
10	PB-3	7707	72981	249	2354
11	Palo Blanco Media	39494	329067	1274	10615
12	La Pichosa	17703	137813	571	4446
13	El Soche				
14	La Mina	358	2866	12	92
15	PB-4				
16	La Osa Baja	3895	44181	126	1425
17	La Osa	45496	375615	1468	12117
18	Laureles	38026	360412	1227	11626
19	Palo Blanco Alta	37960	315559	1225	10179
20	Ramajal	14621	113552	472	3663
21	Vitelma				
		475790	3984799	15348	128542

Tabla 7-19. Resultado de los volúmenes de entrega de sedimentos para la combinación del periodo de retorno de 100 años par lluvia y 1000 años para sismo.

- (1) Nombre de la subcuenca
- (2) Volúmen de entrega de sedimentos calculado como el producto del volumen inestable por el coeficiente de producción obtenido de la curva inferior propuesta por Diaz-Granados (Ver Figura 5-8)

- (3) Volúmen de entrega de sedimentos calculado como el producto del volumen inestable por el coeficiente de producción obtenido de la curva superior propuesta por Diaz-Granados (Ver Figura 5-8)
- (4) Volumen de entrega de sedimentos, afectado por los coeficientes de producción y por el número de tormentas efectivas: Columna (2) / Número de Tormentas efectivas, el cual fue estimado en un promedio de 31 Tormentas en el año.
- (5) Volumen de entrega de sedimentos, afectado por los coeficientes de producción y por el número de tormentas efectivas: Columna (3) / Número de Tormentas efectivas, el cual fue estimado en un promedio de 31 Tormentas en el año.

Respecto al cálculo de los volúmenes de entrega de sedimentos debe mencionarse que se utilizó la curva inferior propuesta por Diaz – Granados para hallar los coeficientes de producción, ya que los los valorse obtenidos son más cercanos a los medidos en el Estudio de “Saneamiento Ambiental y Control de Crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo” y estos además, fueron divididos por el número de tormentas efectivas, considerando que tales coeficientes son válidos como valores promedios anuales.

En la cuenca del Río San Cristóbal, se estimó un valor de 31 tormentas efectivas anuales, entendiendo como una tormenta efectiva, la que produce un caudal capaz de generar arrastre de material.

Las rutinas de los calculos hechos para la evaluación de sedimentos y analisis de estabilidad regional son presentados en el Anexo D-5.

NUM_MI CRO	AREA (m ²)	Relación Sub / Cuenca	Coeficiente de Producción (D)	TR = 5 Años				TR = 10 Años				TR = 25 Años				TR = 50 Años				
				Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen de sedimentos (m ³)	Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen de sedimentos (m ³)	Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen de sedimentos (m ³)	Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen de sedimentos (m ³)	
1	2638574.33	0.09	0.13	0.13	1387.89	4.89	180.43	84.11	2161.16	7.61	280.95	130.98	3220.42	11.35	418.65	195.18	4133.50	14.56	537.35	250.51
2	507338.67	0.02	0.18	0.20	915.55	18.05	164.80	76.83	1425.66	28.10	256.62	119.64	2124.42	41.87	382.40	178.27	2726.75	53.75	490.82	228.82
3	2912782.87	0.09	0.13	0.13	435.81	1.50	58.68	26.41	678.62	2.33	88.22	41.13	1011.24	3.47	131.46	61.29	1297.95	4.48	168.73	78.86
4	920991.30	0.03	0.16	0.17	125.91	1.37	20.15	9.39	196.06	2.13	31.37	14.62	292.16	3.17	46.75	21.79	375.00	4.07	60.00	27.97
5	213114.97	0.01	0.20	0.24	40.13	1.88	8.03	3.74	62.49	2.93	12.50	5.83	93.12	4.37	18.62	8.68	119.52	5.61	23.90	11.14
6	1206046.96	0.04	0.17	0.16	127.81	1.06	21.73	10.13	199.02	1.65	33.83	15.77	296.57	2.46	50.42	23.50	380.66	3.18	64.71	30.17
7	416737.19	0.01	0.20	0.21	49.74	1.19	9.95	4.64	77.45	1.86	15.49	7.22	115.41	2.77	23.08	10.78	148.13	3.55	29.63	13.81
8	301367.94	0.01	0.20	0.22	47.63	1.58	9.53	4.44	74.16	2.46	14.83	6.92	110.52	3.67	22.10	10.30	141.85	4.71	28.37	13.23
9	1856110.17	0.06	0.14	0.15	134.61	0.73	18.84	8.79	209.60	1.13	29.34	13.68	312.33	1.68	43.73	20.39	400.89	2.16	56.12	26.17
10	462171.09	0.01	0.20	0.20	132.60	2.87	26.52	12.36	206.47	4.47	41.29	19.25	307.67	6.66	61.53	28.69	394.91	8.54	78.98	36.82
11	1782578.10	0.05	0.16	0.15	353.30	1.98	56.53	26.35	550.15	3.09	88.02	41.04	819.80	4.60	131.17	61.15	1052.23	5.90	168.36	78.49
12	1699115.44	0.05	0.16	0.15	1081.52	6.37	173.04	80.67	1684.09	9.91	269.45	125.62	2509.52	14.77	401.52	187.19	3221.05	18.96	515.37	240.26
13	1014760.32	0.03	0.16	0.17	296.84	2.93	47.49	22.14	462.23	4.56	73.96	34.48	688.78	6.79	110.21	51.38	884.07	8.71	141.45	65.94
14	2158366.66	0.07	0.13	0.14	495.15	2.25	64.37	30.01	771.02	3.57	100.23	46.73	1148.93	5.32	149.36	69.63	1474.68	6.83	191.71	89.37
15	898525.56	0.03	0.16	0.17	1218.15	13.56	194.90	90.86	1896.84	21.11	303.49	141.48	2826.55	31.46	452.25	210.84	3627.96	40.38	580.47	270.62
16	127545.03	0.004	0.22	0.28	37.59	2.95	8.27	3.89	58.54	4.59	12.98	6.00	87.23	6.84	19.15	9.95	111.98	8.78	24.63	11.48
17	3393511.19	0.11	0.13	0.12	556.99	1.55	72.37	33.74	866.81	2.41	112.68	52.53	1281.86	3.59	167.62	78.38	1657.88	4.61	215.52	100.48
18	3290826.23	0.10	0.13	0.13	350.18	1.06	45.52	21.22	545.28	1.66	70.89	33.05	812.54	2.47	105.63	49.24	1042.92	3.17	135.58	63.21
19	4304468.90	0.13	0.13	0.12	274.16	0.64	35.64	16.62	426.90	0.99	55.50	25.87	636.14	1.48	82.70	38.55	916.51	1.90	106.15	49.49
20	1993230.23	0.06	0.14	0.14	1063.08	5.33	148.83	69.39	1655.37	8.30	231.75	108.04	2466.73	12.38	345.34	161.00	3166.12	15.88	443.26	206.65
21	641279.84	0.02	0.18	0.19	782.32	12.20	140.82	65.65	1218.20	19.00	219.28	102.23	1815.28	28.31	326.75	152.33	2329.96	36.33	419.39	195.52
	33139443.35		1.00		9906.63	2.99	1504.41	701.35	15426.12	4.65	2342.59	1092.12	22887.01	6.94	3490.77	1627.40	29504.47	8.90	4480.51	2088.81

NUM_MI CRO	AREA (m ²)	Relación Sub / Cuenca	Coeficiente de Producción (D)	TR = 70 Años				TR = 90 Años				TR = 100 Años				
				Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen (m ³)	Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen (m ³)	Peso (T)	Tasa de Erosión (T/Ha)	Producción de sedimentos (T)	Volumen (m ³)	
1	2638574.33	0.09	0.13	0.13	4588.20	16.06	692.57	276.25	5005.32	17.63	660.69	303.35	8237.33	18.25	680.85	317.41
2	507338.67	0.02	0.18	0.20	3006.92	59.27	541.25	252.33	3301.87	65.08	594.34	277.08	3454.92	68.10	621.89	289.92
3	2912782.87	0.09	0.13	0.13	1431.31	4.91	186.07	86.75	1571.71	5.40	204.32	95.26	1644.56	6.66	213.79	99.67
4	920991.30	0.03	0.16	0.17	413.53	4.49	66.16	30.85	454.09	4.93	72.65	33.87	476.14	6.16	76.02	36.44
5	213114.97	0.01	0.20	0.24	131.80	6.18	26.36	12.29	144.72	6.79	28.84	13.49	151.43	7.11	30.29	14.12
6	1206046.96	0.04	0.17	0.16	419.77	3.48	71.36	33.27	480.94	3.82	76.36	36.53	482.31	4.00	81.99	38.23
7	416737.19	0.01	0.20	0.21	163.35	3.92	32.67	15.23	179.37	4.30	35.87	16.72	187.68	4.50	37.54	17.50
8	301367.94	0.01	0.20	0.22	156.42	5.19	31.28	14.59	171.77	5.70	34.35	16.02	179.73	5.96	35.95	16.76
9	1856110.17	0.06	0.14	0.15	442.08	2.38	81.89	28.85	485.44	2.62	67.96	31.66	807.95	2.74	71.11	33.15
10	462171.09	0.01	0.20	0.20	435.48	9.42	87.10	40.60	478.20	10.35	95.64	44.59	500.37	10.83	100.07	46.65
11	1782578.10	0.05	0.16	0.15	1160.35	6.51	185.66	86.55	1274.17	7.15	203.87	95.04	1333.23	7.48	213.32	99.45
12	1699115.44	0.05	0.16	0.15	3552.00	20.90	558.32	264.95	3900.42	22.96	634.07	290.84	4061.21	24.02	653.99	304.43
13	1014760.32	0.03	0.16	0.17	974.91	9.61	155.99	72.72	1070.54	10.55	171.29	79.85	1120.18	11.04	179.23	83.66
14	2158366.66	0.07	0.13	0.14	1626.20	7.53	211.41	89.56	1785.71	8.27	232.14	108.23	1868.49	8.66	242.90	113.24
15	898525.56	0.03	0.16	0.17	4000.73	44.53	640.11	298.42	4393.18	48.89	702.91	327.69	4596.79	51.18	735.49	342.88
16	127545.03	0.004	0.22	0.28	123.48	9.88	27.16	12.66	135.57	10.63	29.83	13.90	141.85	11.12	31.21	14.59
17	3393511.19	0.11	0.13	0.12	1828.22	5.09	237.67	110.80	2007.56	5.59	280.98	121.67	2100.61	6.88	273.08	127.31
18	3290826.23	0.10	0.13	0.13	1180.07	3.49	149.51	69.70	1282.89	3.84	164.18	76.54	1321.43	4.02	171.79	80.09
19	4304468.90	0.13	0.13	0.12	900.40	2.09	117.05	54.67	988.72	2.30	128.53	59.92	1034.55	2.40	134.49	62.70
20	1993230.23	0.06	0.14	0.14	3491.43	17.52	488.80	227.88	3833.91	19.23	536.75	250.23	4011.62	20.13	561.63	261.83
21	641279.84	0.02	0.18	0.19	2569.35	40.07	462.48	215.61	2821.39	44.00	507.85	236.76	2952.17	46.04	531.39	247.73
	33139443.35		1.00		32535.94	9.82	4940.86	2303.43	35727.49	10.78	5425.52	2529.38	37383.53	11.28	5677.01	2646.62

Tabla 7-20. Producción de sedimentos por erosión consolidados por subcuencas, para tormentas con diferentes periodos de retorno

7.4 Hidrología

7.4.1 Características fisiográficas de la cuenca

Las características fisiográficas generales de la cuenca tales como área, perímetro, longitud del cauce, diferencias de cotas y pendiente, se determinaron a partir de la cartografía básica elaborada por el grupo de trabajo de la Universidad Nacional de Colombia; de aquí, se encontró que la cuenca tiene un área total de 32.88 Km², con una longitud del cauce principal de 11.68 km y un perímetro de 27.38 km.

De igual forma, como se muestra en la Figura 7-5, se realizó la división de la cuenca de en diferentes subcuencas, a las cuales se les estimó, a partir de la cartografía, parámetros importantes como el área, el perímetro, la pendiente y el tiempo de concentración empleando la expresión de Kirpich, Tabla 7-21. En esta tabla, las zonas PB-1, PB-2, PB-3, son áreas afluentes directas al cauce de la quebrada Palo Blanco; de igual forma, la zona San Cristóbal es un área afluente directa al cauce del río san Cristóbal. La longitud máxima medida en la cuenca (L_{max}) es de 7.32 km y el ancho máximo (B_{max}) es igual a 4.79 km.

Factores de forma en la cuenca

El índice de Gravelius o coeficiente de compacidad, que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área igual al área de la cuenca, indica que cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad; para una cuenca circular tal índice presenta un valor mínimo igual a uno y mientras más cercano este a este valor, hay más tendencia a presentarse crecientes. Para la cuenca, dicho índice es igual a 1.34, lo cual indica que la forma de la cuenca es ovalada redonda con tendencia a concentrar grandes volúmenes de agua.

El índice de alargamiento $I_a = L_{max} / B_{max}$, que relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo, es igual a 1.47; esto muestra que la forma de la cuenca es alargada con un cauce principal relativamente corto.

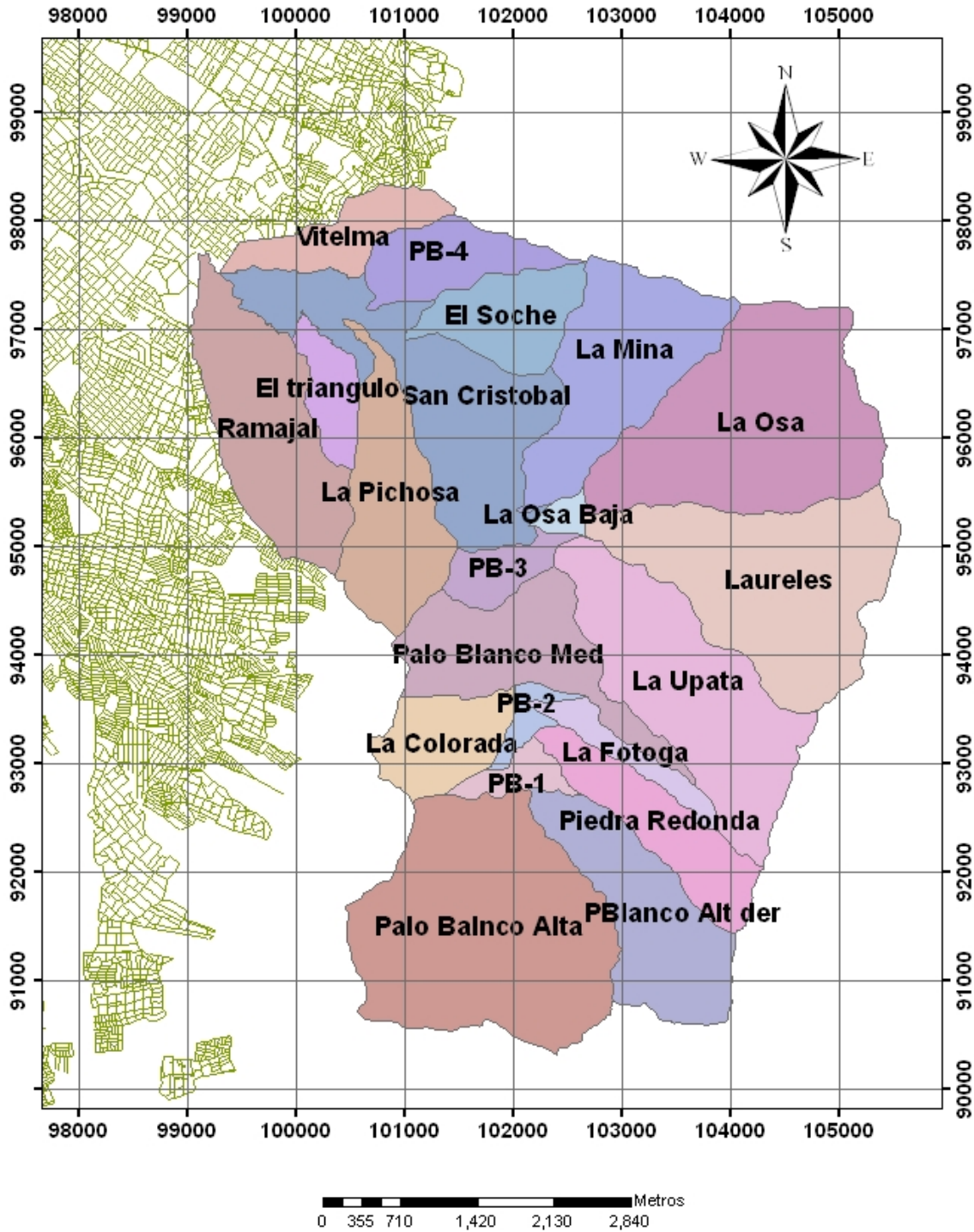


Figura 7-5. División en subcuencas para la zona de estudio

NOMBRE	ÁREA m ²	PERÍMETRO m	ELEVACIÓN MEDIA m.s.n.m.	MÁXIMA LONGITUD m	PENDIENTE m/Km	TIEMPO DE CONCENT. (KIRPICH) Minutos
El Soche	1007550	5802	2961.7	2109.29	74.67	19.10
El Triangulo	521955	6264	2795.2	2150.62	32.27	26.78
La Colorada	914607	5376	3228.3	1911.59	34.93	23.73
La Fotoga	618507	7974	3201.2	2695.93	24.58	35.40
La Mina	2165526	10068	3139.2	3538.83	38.53	36.71
La Osa	3562911	11094	3218.1	3664.14	43.40	36.02
La Osa Baja	121437	2022	2939.2	791.04	28.72	12.97
La Pichosa	1419543	8838	3020.0	3374.18	41.36	34.44
La Upata	2903787	11016	3213.1	4162.10	31.83	44.77
Laureles	3170781	11532	3288.7	3694.65	35.63	39.11
Palo Blanco Alta	4431681	11526	3261.0	3015.49	29.61	35.92
Palo Blanco Alto Derecho	1850058	9204	3398.4	3322.28	26.95	40.13
Palo Blanco Medio	1782585	11016	3021.4	2830.19	36.94	31.41
PB-1	180450	2718	3080.0	830.17	37.10	12.20
PB-3	552393	5118	2977.9	1462.76	47.22	17.19
PB-4	780309	6342	2958.3	2740.45	41.31	29.35
PB-4-2	243990	3186	2755.8	988.60	41.29	13.39
Piedra Redonda	1217763	8280	3381.1	3115.12	29.76	36.76
Ramajal	2375418	8279	2771.5	4060.40	28.78	45.66
San Cristóbal	1995633	9234	2836.4	3136.63	64.95	27.36
Vitelma	641300	4141.28	2782.5	1671.80	18.54	11.25

Tabla 7-21. Parámetros fisiográficos de las subcuencas del río San Cristóbal

Perfil longitudinal del cauce

El cauce del río San Cristóbal, va desde la cota 3512 m.s.n.m., hasta la cota 2581 m.s.n.m., en el límite inferior de la zona de estudio, para una pendiente promedio de todo el cauce de 7.97%.

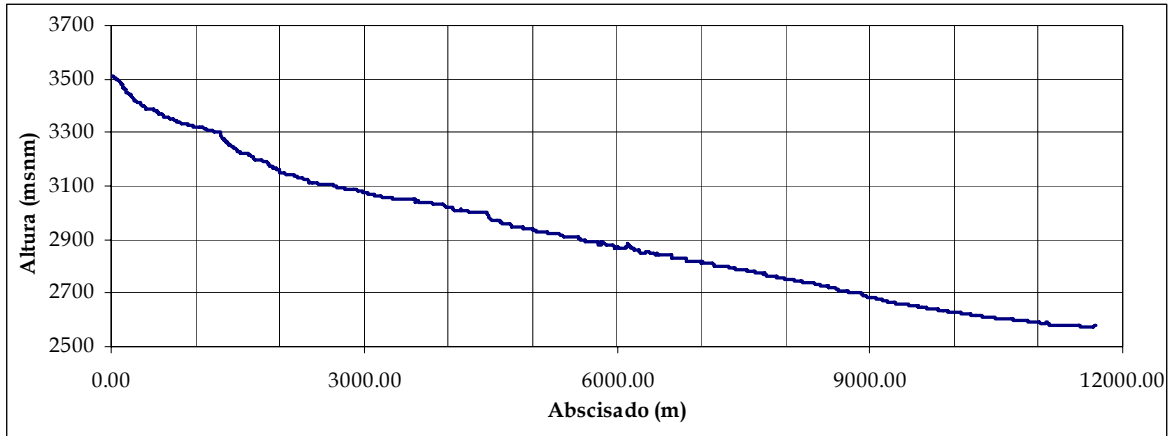


Figura 7-6. Perfil longitudinal

La Tabla 7-22. muestra los cálculos realizados para determinar la pendiente a partir del método de Taylor; el resultado obtenido, muestra un valor de la pendiente promedio del cauce igual a 6.35%, inferior al resultado obtenido de 7.97% a partir de la diferencia de cotas inicial y final del cauce sobre la longitud total del mismo.

ABSCISA (m)	COTA (m.s.n.m.)	DIFERENCIA DE ABSCISAS (m)	DIFERENCI A DE COTAS (m)	PENDIENTE DEL TRAMO (m/m)	$L_i/(S_i)^{0.5}$
		$[L_i]$	$[Y_i]$	$[S_i]$	
0.00	3512.01	--	--	--	--
69.66	3500.00	69.66	-12.01	0.172	167.75
369.50	3400.60	299.84	-99.40	0.331	520.78
1249.74	3300.00	880.24	-100.60	0.114	2603.74
1725.52	3200.00	475.78	-100.00	0.210	1037.79
2659.59	3100.00	934.06	-100.00	0.107	2854.73
4248.09	3000.00	1588.50	-100.00	0.063	6331.11
5559.69	2900.00	1311.61	-100.00	0.076	4750.13
7166.48	2800.00	1606.79	-100.00	0.062	6440.78
8896.79	2700.01	1730.30	-99.99	0.058	7198.06
10733.96	2600.71	1837.17	-99.30	0.054	7902.08
11679.87	2581.00	945.91	-19.71	0.021	6552.86
ΣL_i		11679.87	$\Sigma (L_i/(S_i)^{0.5})$		46359.81

Tabla 7-22. Cálculo de la pendiente por el método de Taylor

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda una partícula de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta un punto de interés. Este parámetro es importante en un modelo lluvia - escorrentía, puesto que a partir de este se define la duración de la tormenta que se asume igual al tiempo de concentración, ya que con duraciones menores, no toda el área de drenaje contribuye al caudal en un punto de interés, y para duraciones más grandes, no hay incremento en el área contribuyente y la intensidad de la lluvia para una frecuencia dada, disminuye.

Para la cuenca del río San Cristóbal, el tiempo de concentración estimado a partir de las diferentes ecuaciones presentadas en el marco teórico, se muestran en la Tabla 7-23, siendo importante resaltar que los parámetros empleados corresponden a un área total de la cuenca de 32.88 Km², con una pendiente promedio de 6.35% y una longitud del cauce principal de 12 Km.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN		
ECUACIÓN	HORAS	MINUTOS
Témez	2.06	124
Kirpich	3.07	184
Giandioti	5.87	352
Pérez	3.38	203

Tabla 7-23. Tiempos de concentración en la cuenca

Se puede apreciar que los tiempos de concentración calculadas con las diferentes ecuaciones, presentaron diferentes valores; la ecuación de Pérez y Kirpich obtuvieron resultados cercanos; en promedio, se podría decir que el tiempo de concentración de la cuenca es de 3 horas (180 minutos).

Orden de los cauces en la cuenca

El orden de los cauces en la cuenca se asignó aplicando el método de Strahler propuesto en 1952, por dicho autor. Este método consiste en que el orden de la corriente aumenta cuando es intersecada por otra corriente con el mismo orden; por ejemplo, si un cauce de primer orden se conecta a otro de segundo orden, el cauce resultante conserva el segundo orden, pero si dos corrientes de segundo orden se intersecan entre sí, la tercera corriente resultante tendrá un orden tres, y así sucesivamente. Para el caso del Río San Cristóbal, este a la salida en la zona de estudio, presenta un orden 6.

Otras corrientes afluentes al cauce del río, presentan ordenes cuatro como es el caso de las quebradas La Pichosa, Ramajal, El triangulo. En la Figura 7-7 se presenta el orden de los cauces.

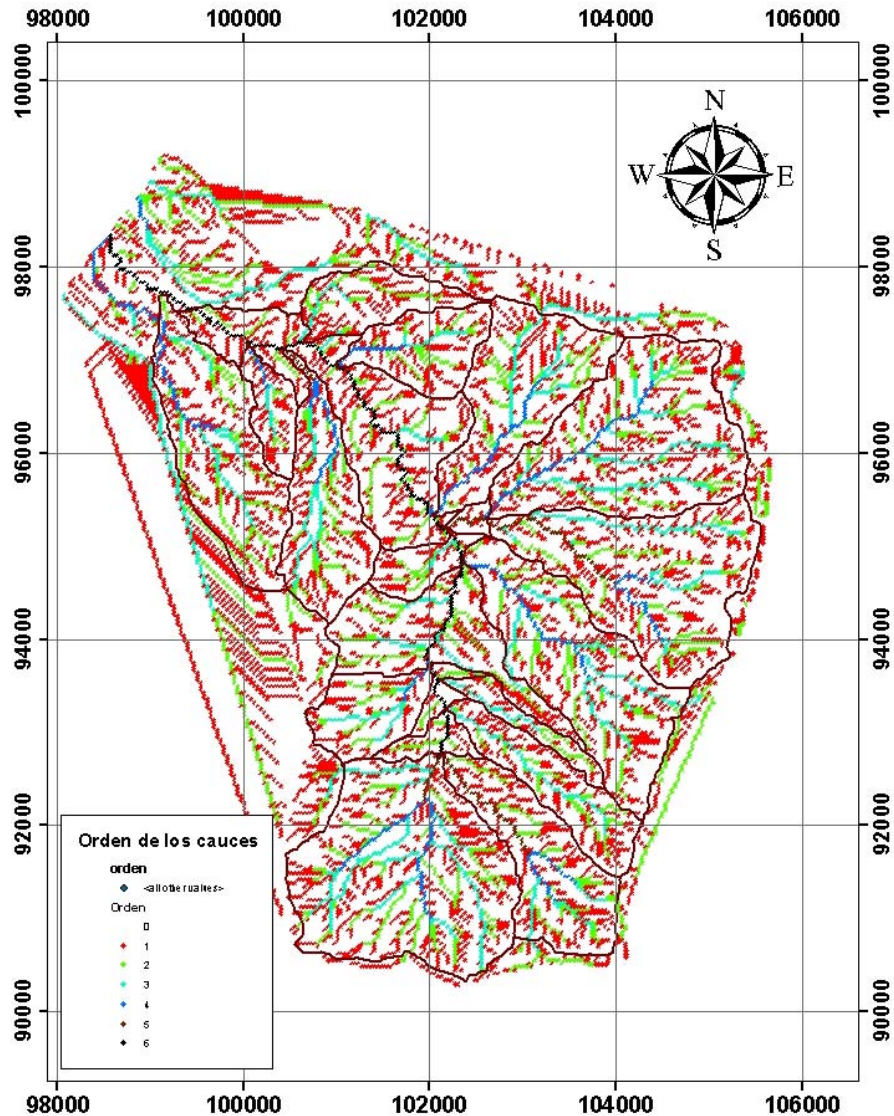


Figura 7-7. Orden de los cauces según Strahler

Curva Hipsométrica de la cuenca

En la siguiente figura, se presenta la curva hipsométrica de la cuenca. Aquí se puede apreciar, que la elevación media es de 3200.55 m.s.n.m.

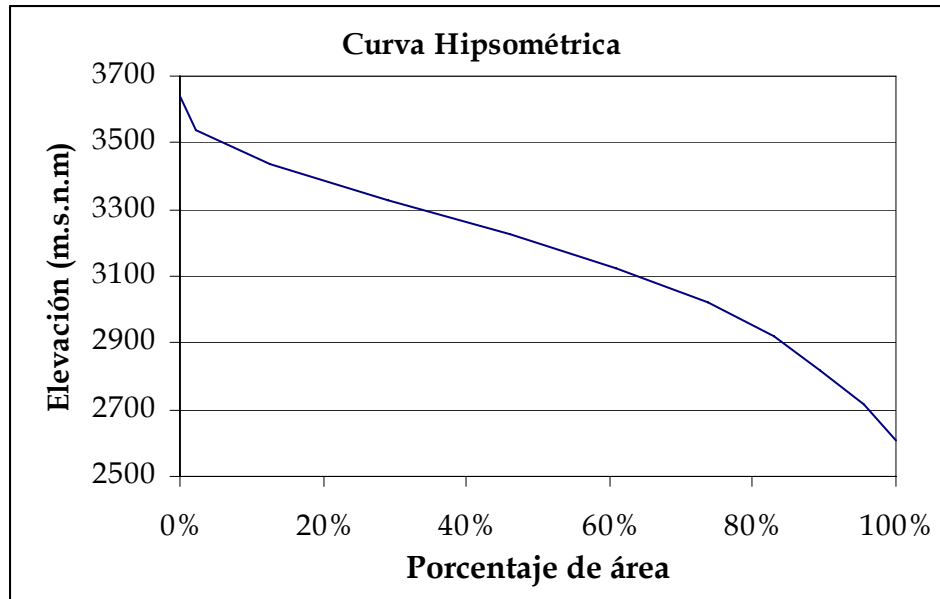


Figura 7-8. Curva Hipsométrica de la cuenca

7.4.2 Análisis de los datos de lluvia en la cuenca

A continuación se presenta el análisis temporal de la información de lluvias sobre la cuenca a partir de los registros de pluviómetro de las estaciones localizadas dentro de la zona de estudio y cercanas a la misma.

Llenado de datos faltantes

Para el presente estudio, no se realizó el llenado de datos faltantes, debido a dos razones: en primer lugar, la finalidad del análisis hidrológico es estimar caudales de creciente para eventos de lluvia extrema; al realizar el llenado de datos, los valores que se completan en las series tiende a los valores promedio lo cual de una forma u otra los excluye del análisis de eventos extremos; En segundo lugar, las estaciones empleadas no presentaron vacíos grandes en la información, lo cual da una mayor confiabilidad en cuanto a la consistencia de las series históricas.

Consistencia de los datos de lluvia

Para analizar la consistencia de los registros pluviométricos, se construyeron curvas de doble masa, con las cuales es fácil determinar si la estación ha permanecido durante el período de observaciones bajo las mismas condiciones sin cambiar el instrumento y/o las condiciones del sitio donde se ubica el pluviómetro.

Se tomaron como datos base, los promedios de los valores acumulados de precipitación para las estaciones que tuviesen igual o mayor número de registros y que en este caso corresponde a la estación El Delirio. Como se puede apreciar, en general, el comportamiento de los valores totales anuales acumulados, presentan una tendencia lineal bien marcada, con coeficientes de correlación que oscilan entre valores de 0.90 y 0.99 en todos los casos. Esto indica que hay consistencia en la toma de los datos de cada estación, es decir las condiciones se han mantenido durante el período de registro de cada estación.

Análisis temporal de los datos de lluvia

Como se muestra en la Figura 7-9, el régimen de precipitación alrededor de la cuenca y dentro de la misma es bimodal. En la estación El Delirio, al igual que en la estación La María, los valores altos se presentan entre los meses de mayo, junio, julio y agosto, en tanto que los valores más bajos se encuentran entre los meses de diciembre a febrero. Las estaciones Vitelma y Guadalupe marcan los picos de valores máximos en los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre. La estación Juan rey, tiene un comportamiento similar al de la estación El Delirio. Obsérvese que el valor promedio más alto (228.6 mm), lo presenta la estación La María en el mes de julio, valor que supera en casi el doble del valor promedio de esta estación.

En términos generales, los valores promedios mensuales de las estaciones están entre 84 y 108 mm, siendo nuevamente la estación La maría la que presenta el mayor promedio. Los valores mínimos en todas las estaciones se presentan para el mes de enero con valores entre 46 y 59 mm.

La estación El Delirio en el período comprendido entre los años 1942 y 2006 presenta varios eventos de valores máximos: El 4 de diciembre de 1966 la lluvia promedio diaria fue de 115.6 mm, con valores inferiores a los 3.0 mm en tres días anteriores a dicho evento (la estación Vitelma registró un valor de 10.0 mm con una lluvia el día anterior de 34.0 mm, para esa misma fecha). Igual es el caso del evento del día 24 de marzo de 1974, el cual presentó un valor de 102.8 mm y en la estación Vitelma registró un valor de 8.3 mm. Un evento un poco más reciente fue el que se presentó entre los días 11, 12, 13 y 14 de julio de 1997, con valores registrados de 55.0, 65.0, 12.7 y 21.7 mm respectivamente, y que presentó valores en la estación Vitelma para los mismos días de 34.5, 31.5, 6.7 y 17.3 mm, respectivamente.

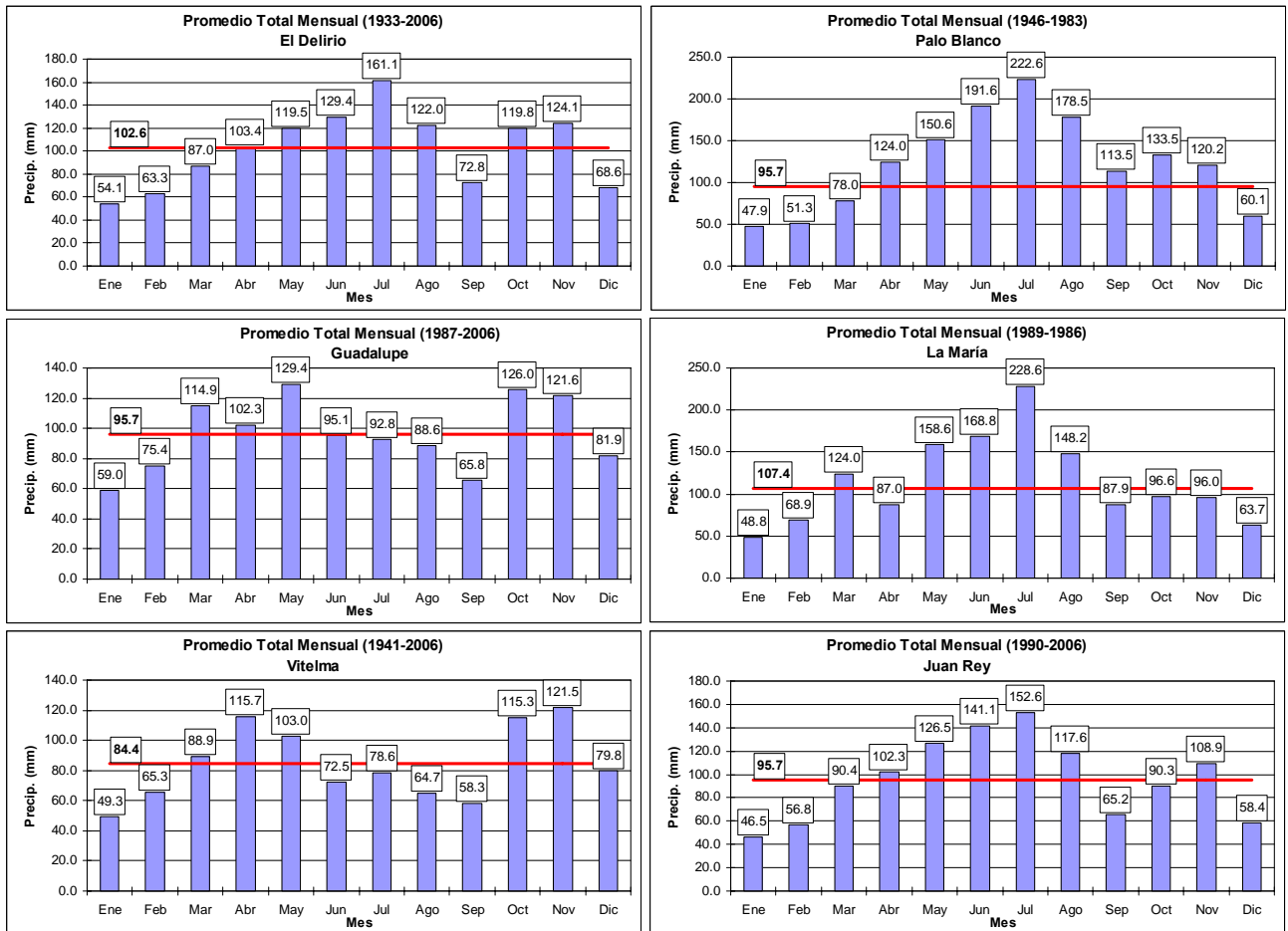


Figura 7-9. Precipitación media mensual multianual

De acuerdo a lo anterior, al observar que los registros con valores máximos tenían tendencia a ser aislados (lo que ocurrió con los valores superiores a 100 mm), se analizaron las series mes a mes en la estación El Delirio, buscando registros consecutivos con valores altos (el criterio para establecer cuando un valor es alto, fue tomar aquellos registros superiores a 30 mm).

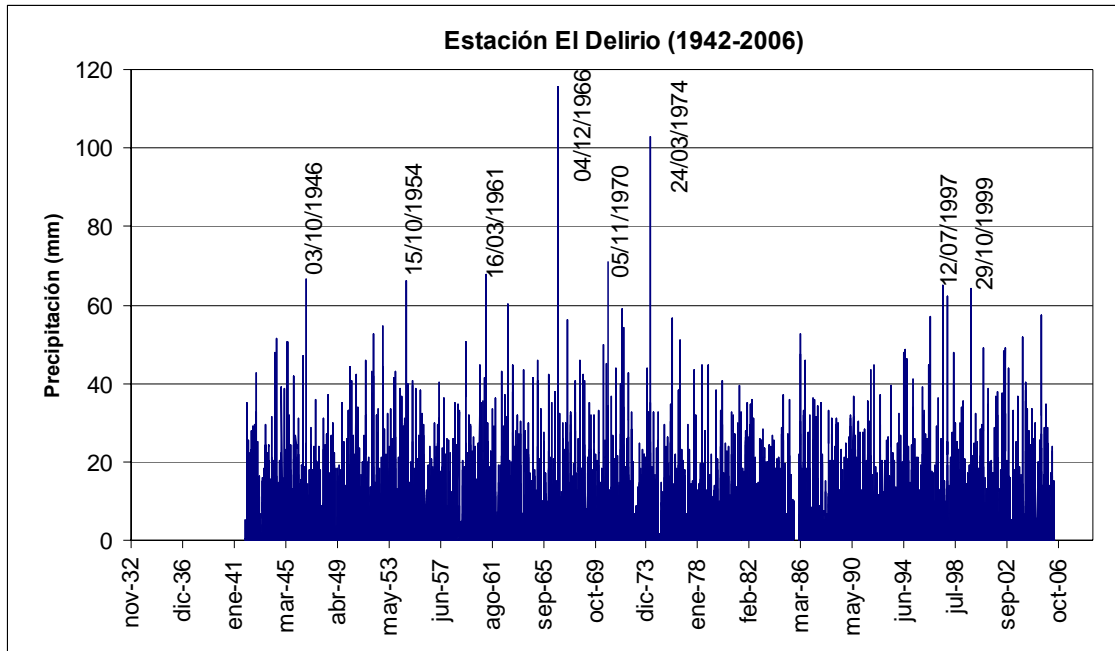


Figura 7-10. Precipitación diaria estación El Delirio

En la serie de la estación El Delirio, se puede apreciar que se presentan eventos con valores superiores a 60 mm, entre el año 1943 hasta el año 1975, con una recurrencia aproximada entre 6 y 8 años, contrario a lo que ocurre del año 1975 hasta el 2006, período para el cual sólo se presentan tres eventos con valores superiores a 60 mm e inferiores a los 70 mm, y sin una tendencia clara a la recurrencia de estos eventos.

La estación Vitelma (Figura 7-11), presenta valores máximos por debajo de los 80 mm, aunque se pueden apreciar ocho eventos con valores superiores a los 60 mm; para estos eventos, no hay una tendencia clara en cuanto a la recurrencia de estos valores extremos.

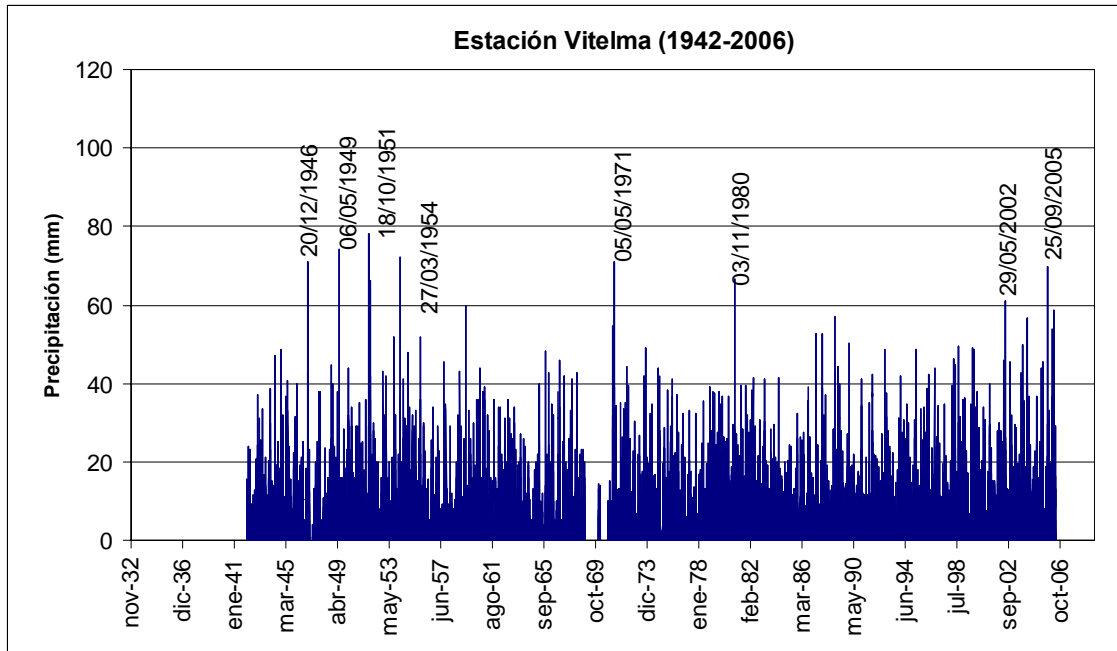


Figura 7-11. Precipitación diaria estación Vitelma

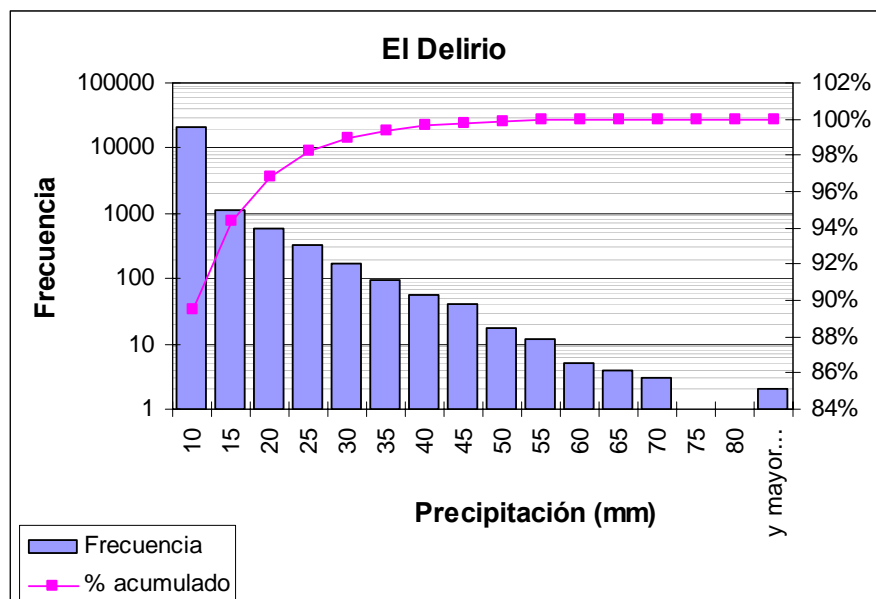


Figura 7-12. Frecuencias de datos de lluvia estación El Delirio

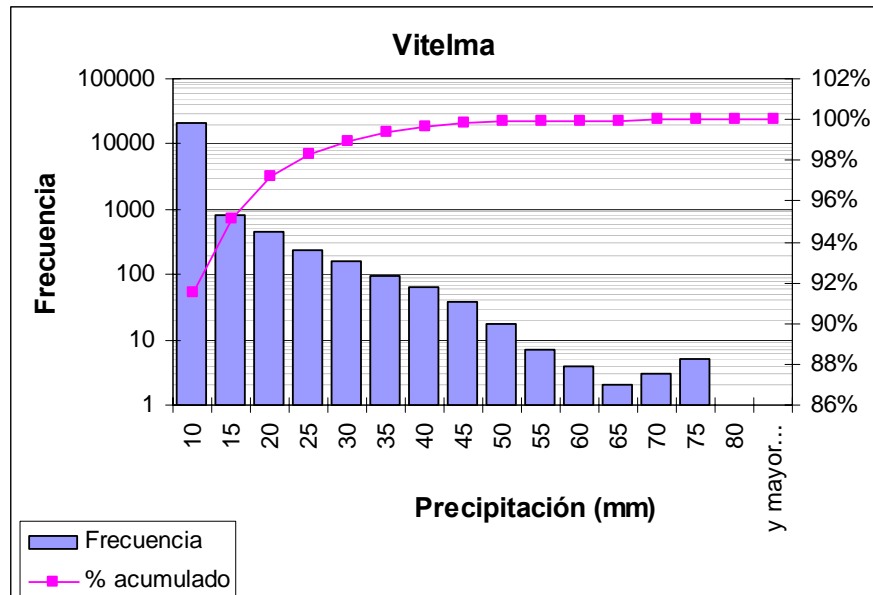


Figura 7-13. Frecuencias de datos de lluvia estación Vitelma

RANGOS DE PRECIPITACIÓN (mm)	% ACUMULADO		% ACUMULADO	
	FRECUENCIA		FRECUENCIA	
	EL DELIRIO		VITELMA	
10	20760	89.45%	20498	91.54%
15	1141	94.36%	803	95.12%
20	575	96.84%	463	97.19%
25	324	98.24%	237	98.25%
30	171	98.97%	156	98.95%
35	97	99.39%	95	99.37%
40	56	99.63%	64	99.66%
45	40	99.81%	37	99.82%
50	18	99.88%	18	99.90%
55	12	99.94%	7	99.93%
60	5	99.96%	4	99.95%
65	4	99.97%	2	99.96%
70	3	99.99%	3	99.97%
75	1	99.99%	5	100.00%
80	0	99.99%	1	100.00%
y mayor...	2	100.00%	0	100.00%

Tabla 7-24. Frecuencias de datos de lluvia estaciones El Delirio y Vitelma

Las frecuencias de los datos de lluvia para la estación El Delirio, muestran que el 89.45% de los datos, se encuentran en el rango de valores entre 0 y 10 mm. Para la estación Vitelma, este porcentaje es de 91.54% en el mismo período de análisis. Como ya se había mencionado, esta estación no presenta valores superiores a los 70 mm, contrario a El Delirio, que presenta 6 datos por encima de este valor.

De acuerdo a lo observado en las frecuencias de los datos, los valores mayores a 80 mm, presentan una recurrencia alta en ambas estaciones, algo típico en los datos registrados en una estación pluviométrica.

Análisis espacial y temporal

La Figura 7-15, muestra la precipitación total anual en las estaciones El Delirio, Vitelma y Palo Blanco. Se puede apreciar que la precipitación promedio multianual en las estaciones, disminuye con respecto a la altura; La estación Palo blanco, localizada en la parte alta, registra un promedio de precipitación total anual de 1457.1 mm, así mismo, la estación El Delirio en la parte media registra un valor de 1210.8 mm, y la estación Vitelma en la parte baja, presenta un valor total promedio de 998.5 mm.

Es posible ver también, de acuerdo a estas gráficas, que la precipitación muestra tendencias claras respecto a periodos secos y lluviosos. Por ejemplo, entre los años 1950 y 1955 se presentaron en estas estaciones valores altos de precipitación total anual, seguida de un período de 10 años (entre 1956 y 1966), de valores de precipitación por debajo del valor promedio. Así mismo se muestra claramente un periodo lluvioso entre los años 1967 y 1976. Observando los datos de la última década (del año 2000 hasta la fecha), los valores en las estaciones Vitelma y El Delirio tienden a comportarse cerca del valor promedio.

Las isoyetas de precipitación anual, muestran un comportamiento descendiente de la precipitación en relación con la altura. Teniendo en cuenta que los cerros orientales de Bogotá se localizan hacia la parte derecha, hay una disminución de la precipitación promedio total en la medida que se disminuye la altura que es lo que ocurre hacia la parte derecha de la Figura 7-14.

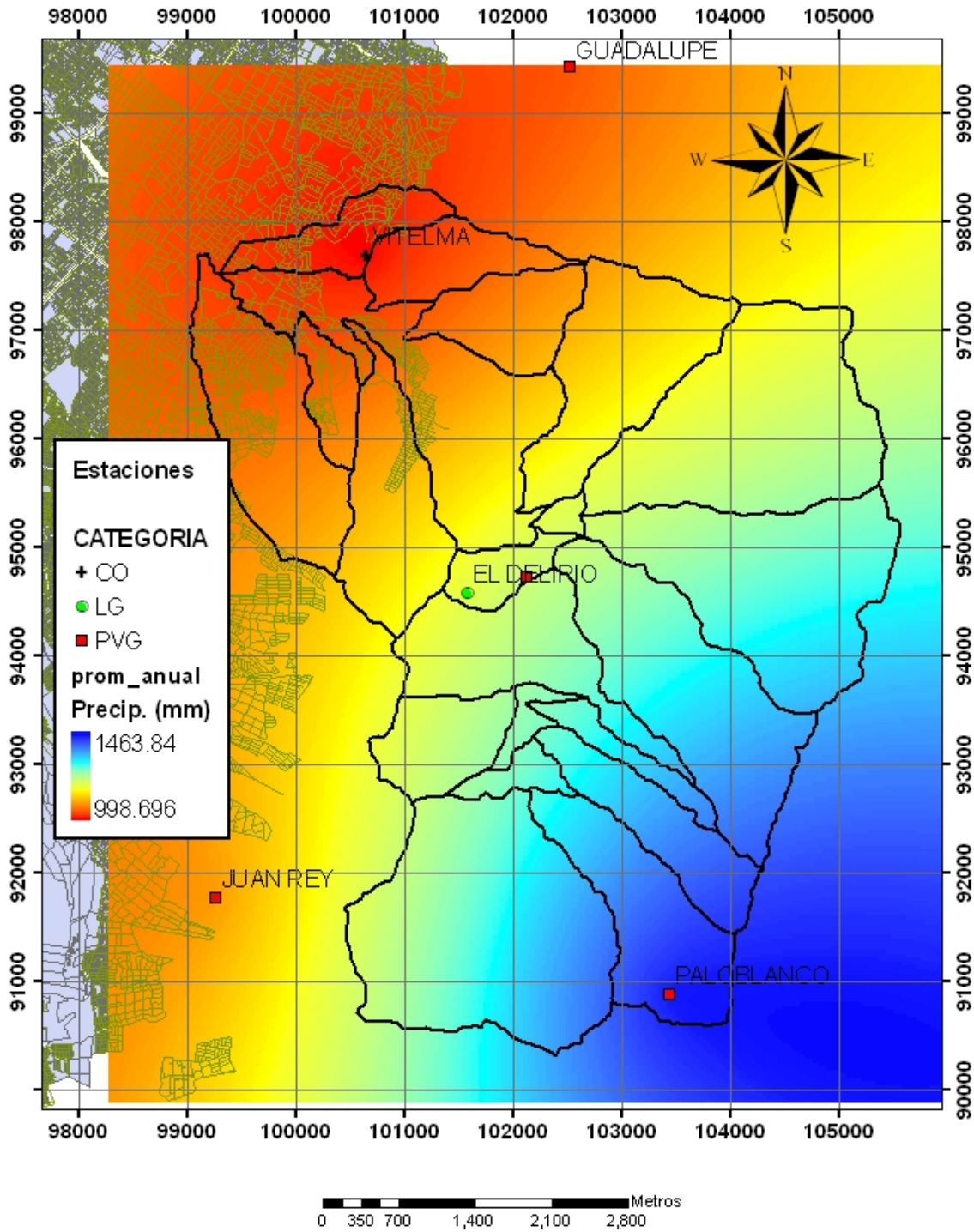


Figura 7-14. Isoyetas de precipitación total anual

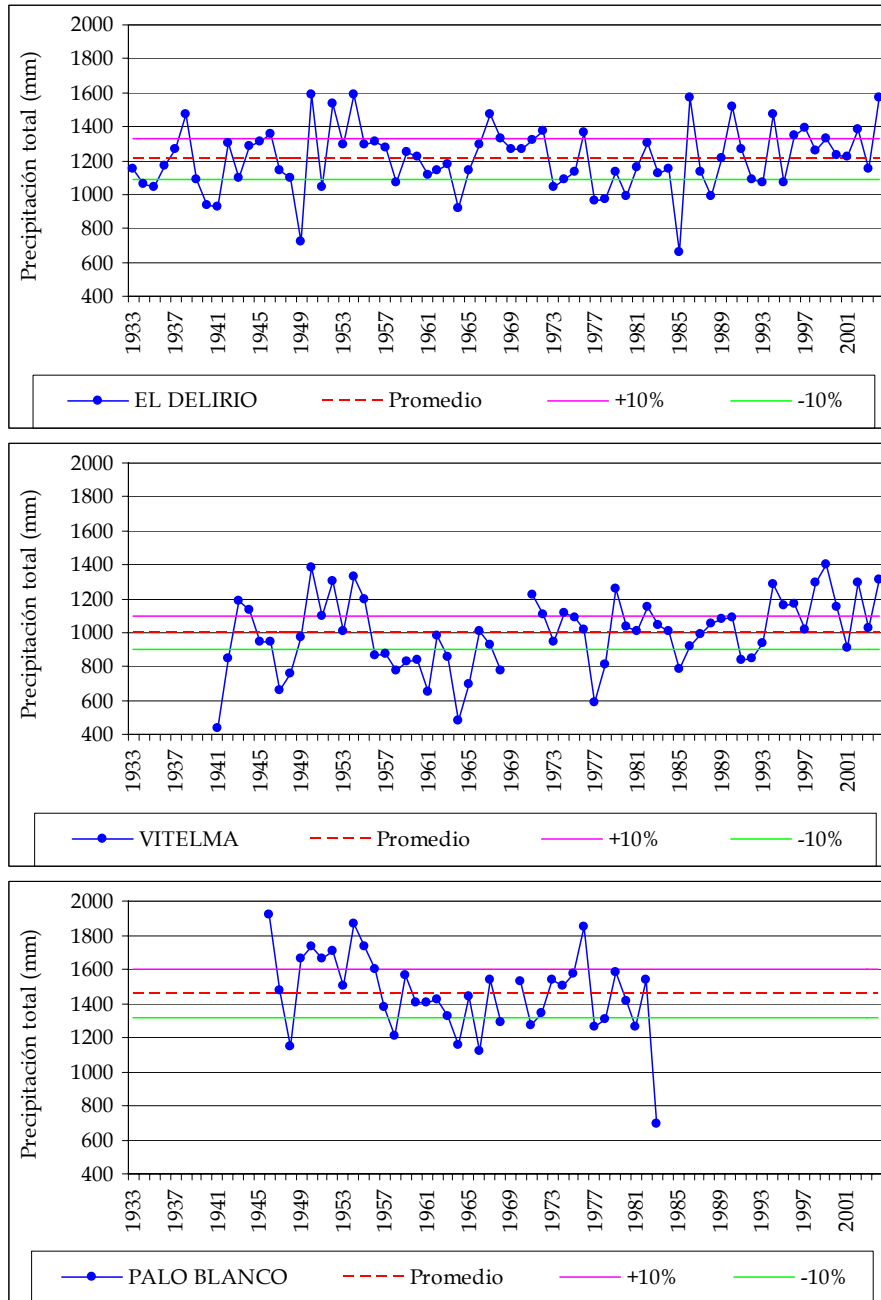


Figura 7-15. Precipitación total anual

Polígonos de Thiessen

Los polígonos de Thiessen se emplearon en este estudio para distribuir la lluvia registrada en las diferentes estaciones sobre el área de estudio. Este método establece que la lluvia sobre una cierta parte de la cuenca es igual a la registrada en el pluviómetro más cercano, permitiendo de esta forma asignar pesos relativos para el cálculo de la precipitación promedio sobre cada subárea y de acuerdo a las estaciones que se encuentren cercanas a ésta. La Figura 7-16. muestra los polígonos de Thiessen para la cuenca y en la Tabla 7-25 se muestran los pesos asignados a cada estación de acuerdo al área de la subcuenca.

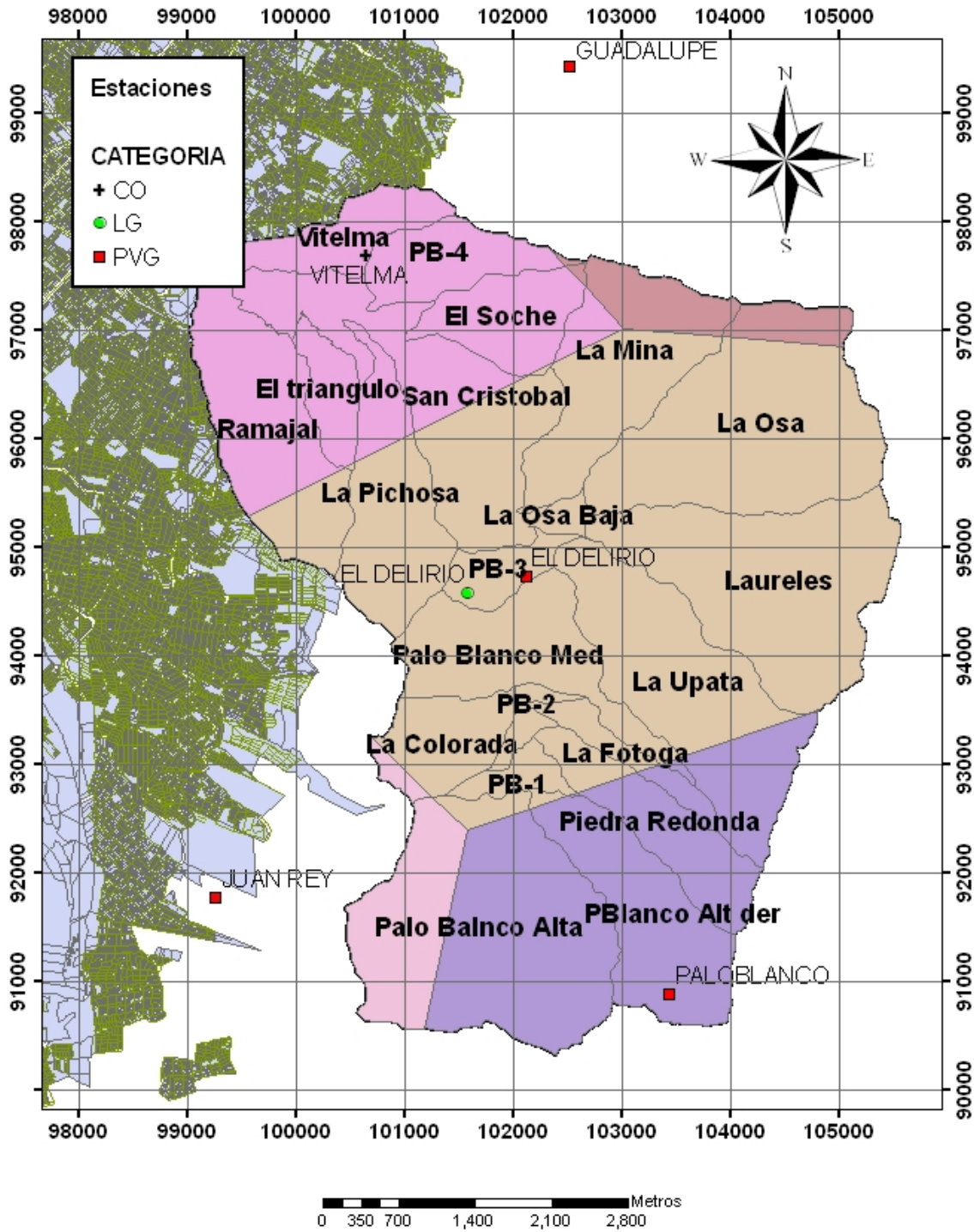


Figura 7-16. Polígonos de Thiessen

Nombre Subcuenca	Nombre de la Estación	Área total subcuenca (Km ²)	Área de cada subcuenca asignada a cada estación (Km ²)	pesos de la estación
San Cristóbal	El Delirio (PG)	283.86	138.65	0.488
San Cristóbal	Vitelma (PG)	283.86	145.21	0.512
El triangulo	El Delirio (PG)	50.73	0.34	0.007
El triangulo	Vitelma (PG)	50.73	50.39	0.993
Ramajal	El Delirio (PG)	237.54	67.61	0.285
Ramajal	Vitelma (PG)	237.54	169.93	0.715
La Upata	El Delirio (PG)	291.28	206.15	0.708
La Upata	PaloBlanco (PM)	291.28	85.13	0.292
La Colorada	Juan Rey (PG)	92.10	10.61	0.115
La Colorada	El Delirio (PG)	92.10	81.49	0.885
PB-2	El Delirio (PG)	21.31	21.31	1.000
Piedra Redonda	El Delirio (PG)	120.60	27.08	0.225
Piedra Redonda	PaloBlanco (PM)	120.60	93.52	0.775
La Fotoga	El Delirio (PG)	41.67	25.70	0.617
La Fotoga	PaloBlanco (PM)	41.67	15.98	0.383
PB-1	El Delirio (PG)	30.14	29.95	0.994
PB-1	PaloBlanco (PM)	30.14	0.18	0.006
PBlanco Alt der	El Delirio (PG)	185.61	3.48	0.019
PBlanco Alt der	PaloBlanco (PM)	185.61	182.13	0.981
PB-3	El Delirio (PG)	46.22	46.22	1.000
Palo Blanco Med	El Delirio (PG)	178.26	175.63	0.985
Palo Blanco Med	PaloBlanco (PM)	178.26	2.63	0.015
La Pichosa	El Delirio (PG)	169.91	132.02	0.777
La Pichosa	Vitelma (PG)	169.91	37.89	0.223
El Soche	El Delirio (PG)	101.48	0.67	0.007
El Soche	Guadalupe (PG)	101.48	2.23	0.022
El Soche	Vitelma (PG)	101.48	98.58	0.971
La Mina	El Delirio (PG)	215.84	137.59	0.637
La Mina	Guadalupe (PG)	215.84	59.91	0.278
La Mina	Vitelma (PG)	215.84	18.35	0.085
PB-4	Guadalupe (PG)	89.85	1.13	0.013
PB-4	Vitelma (PG)	89.85	88.72	0.987
La Osa Baja	El Delirio (PG)	12.75	12.75	1.000
La Osa	El Delirio (PG)	359.35	322.63	0.898
La Osa	Guadalupe (PG)	359.35	36.72	0.102
Laureles	El Delirio (PG)	329.08	329.03	1.000
Laureles	PaloBlanco (PM)	329.08	0.05	0.000
Palo Balnco Alta	Juan Rey (PG)	430.45	137.76	0.320
Palo Balnco Alta	El Delirio (PG)	430.45	18.32	0.043
Palo Balnco Alta	PaloBlanco (PM)	430.45	274.36	0.637
Vitelma	Vitelma (PG)	64.13	64.13	1.000

Tabla 7-25. Pesos asignados a cada estación de acuerdo al área de la subcuenca

Ajuste de datos de lluvia a distribuciones de probabilidad

Con el fin de establecer con mayor precisión los periodos de retorno de los eventos máximos presentados en las estaciones El Delirio y Vitelma, se ajustaron los datos de dichas estaciones, a distribuciones de probabilidad (Log-Normal 2 parámetros, Log-Normal 3 parámetros, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III, y Gumbel Tipo I), obteniendo los siguientes resultados:

Los datos de la estación El Delirio, se ajustaron mejor a la distribución Log-Pearson Tipo III, y los datos de Vitelma a la distribución Pearson Tipo III.

EL DELIRIO (LOG - PEARSON TIPO III)			VITELMA (PEARSON TIPO III)		
PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA (AÑOS ⁻¹)	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	PRECIPITACIÓN N (mm)	PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA (AÑOS ⁻¹)	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	PRECIPITACIÓN N (mm)
0.995	200	113.14	0.995	200	98.92
0.99	100	100.71	0.99	100	91.1
0.98	50	89.28	0.98	50	83.24
0.96	25	78.7	0.96	25	75.28
0.9	10	65.76	0.9	10	64.53
0.8	5	56.5	0.8	5	56.03
0.667	3	49.72	0.667	3	49.39
0.5	2	44.07	0.5	2	43.62

Tabla 7-26. Precipitación asociada a períodos de retorno

El valor máximo registrado en la estación El Delirio, presenta un período de retorno de aproximadamente 200 años, siendo el segundo valor más alto (102.8 mm) asociado a un periodo de retorno de 100 años. Valores por debajo de 80 mm tienen períodos de recurrencia menores a 25 años, siendo el valor correspondiente a 10 años, igual a 66 mm.

En la estación Vitelma, también, valores de lluvia por debajo de 80 mm tienen periodos de recurrencia menores a 25 años. Para 100 años de recurrencia, el valor de precipitación es de 91.0 mm, valor que no se encuentra igualado o superado en la serie de datos de esta estación.

7.4.3 Análisis de los datos de caudales en la cuenca

A partir de los datos de niveles medios y máximos mensuales, y empleando las curvas de calibración de la estación limnigráfica El Delirio, se obtuvieron los caudales medios y máximos mensuales en un período de registro entre el año 1952 y el año 2006 para el cual se cuenta con registros aproximadamente continuos.

En cuanto a los caudales medios, el río San Cristóbal en su parte alta, presenta valores entre 0.25 y 1.42 m³/s, siendo los meses de mayo, junio y julio y diciembre, en los que se presentan los valores mas altos, y los meses de enero, febrero, marzo los que presentan los valores más bajos. Esto coincide con la tendencia de los registros totales mensuales multianuales de precipitación en la estación pluviográfica El Delirio (Figura 7-17).

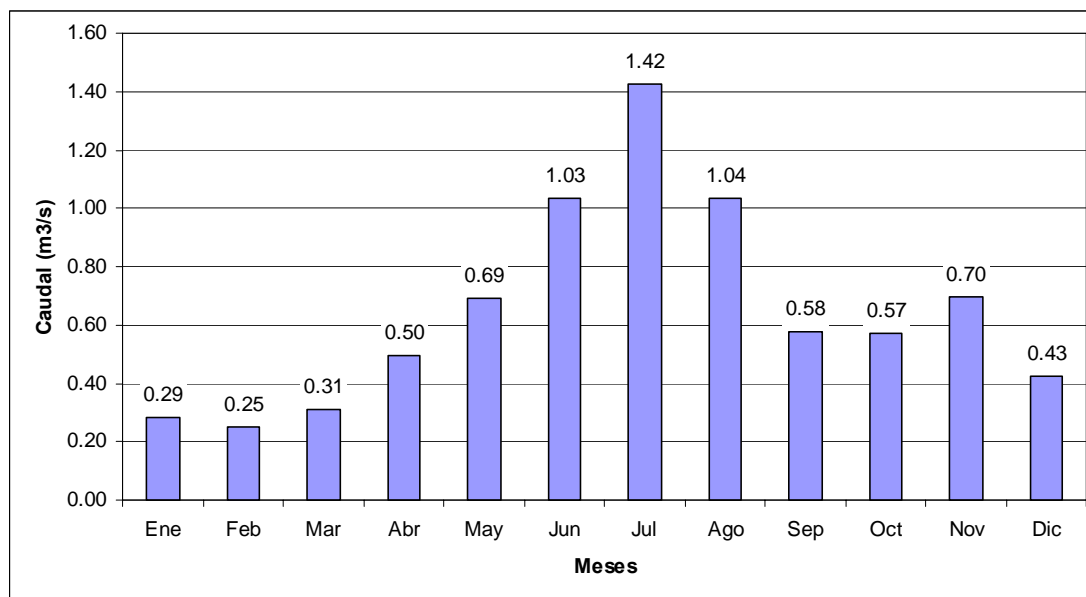


Figura 7-17. Promedio de caudales mensuales multianuales (1990-2001)

Los valores máximos presentados en dicha estación, van desde 4.42 m³/s en el mes de febrero que presenta normalmente valores bajos de precipitación, hasta 26.60 m³/s, en el mes de abril, que es un mes con pluviosidad por encima del promedio (Este valor de caudal máximo, se presentó en el año 1982).

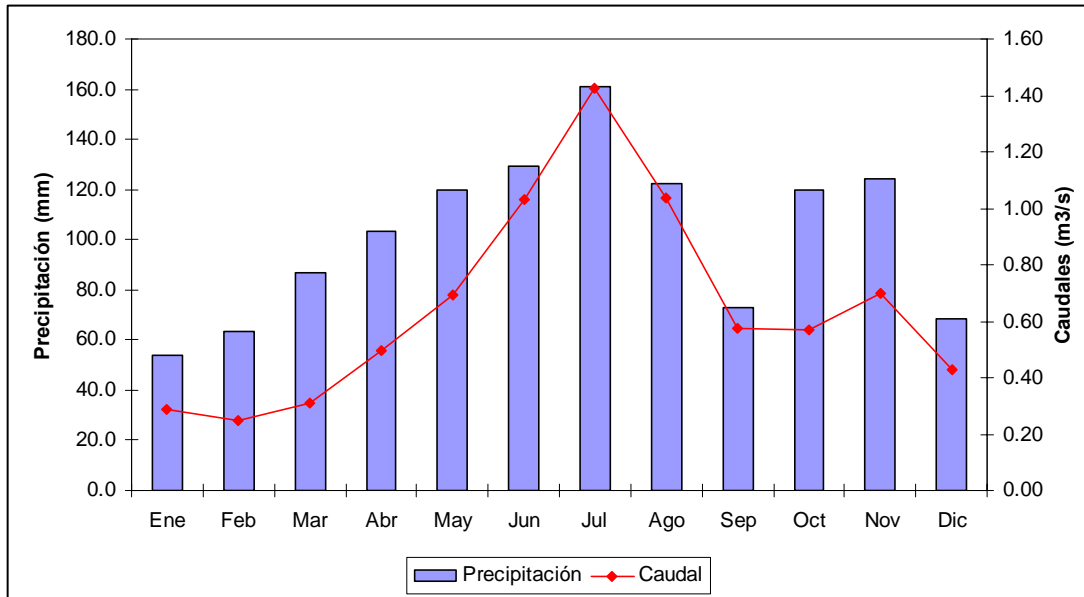


Figura 7-18. Promedio de caudales y promedios de precipitación mensual

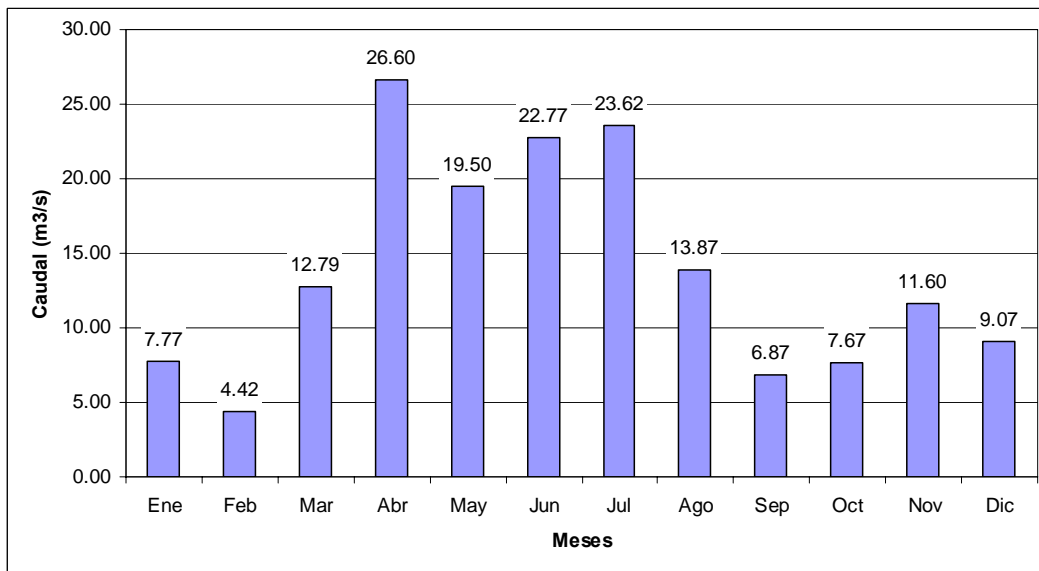


Figura 7-19. Valores máximos de caudales en la estación El Delirio

Adicionalmente, se ajustaron los datos de caudales máximos en esta estación, a una distribución de probabilidad para asociar los eventos máximos a periodos de retorno. Se encontró que la serie de valores máximos se ajustó a una distribución Log – Normal de dos parámetros, y los valores para cada periodo de retorno, se muestran en la Tabla 7-27.

EL DELIRIO (LOG - NORMAL)		
PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA (AÑOS ⁻¹)	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	CAUDAL (m ³ /s)
1.00	200	33.08
0.99	100	28.28
0.98	50	23.82
0.96	25	19.68
0.90	10	14.65
0.80	5	11.10
0.67	3	8.58
0.50	2	6.54

Tabla 7-27. Caudales asociada a periodos de retorno

7.4.4 Análisis de coherencia entre los datos de lluvia y caudal

Teniendo los datos de lluvias y caudales a nivel diario, con estaciones de lluvia localizadas en la cuenca y muy cercanas a la misma, y con un componente importante que es el tener una estación limnigráfica, es posible calibrar un modelo lluvia escorrentía analizando de forma continua para un cierto período de registro de datos simultáneos de lluvia y caudal. Para ello, se emplearan las estaciones pluviográficas El delirio, Vitelma y Palo Blanco, localizadas estratégicamente en la parte alta media y baja de la cuenca.

Para este análisis se escogerá un año en el cual las estas tres estaciones presenten registros, y que corresponda a un período lluvioso, que se establecerá de acuerdo a las tendencias que se pueden apreciar en la Figura 7-21. De igual

forma, como criterio para establecer el período de análisis que corresponderá a un cierto año, se tendrá en cuenta la presencia de eventos máximos de caudales registrados y la disponibilidad de la información.

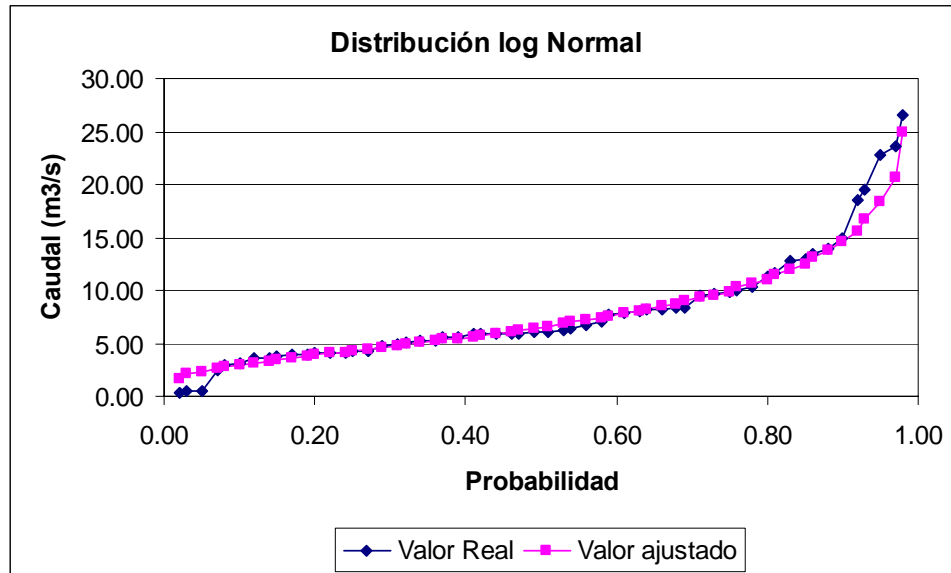


Figura 7-20. Función acumulada de probabilidad

Un análisis de frecuencias para la serie de caudales de la estación El Delirio, muestra que sólo el 0.02% de los datos registrados, son superiores a un valor de caudal de 20 m³/s, lo que corresponde en total a 8 datos de caudales. Por encima de 10 m³/s, en los registros se encuentran un total de 49 datos de 20152 del total, para un porcentaje del 0.13%; el cauce de la quebrada normalmente presenta caudales inferiores a los 2 m³/s que agrupa el 95.33% de los datos.

De acuerdo con esto, los dos años que presentan la mayor cantidad de eventos por encima de los 10 m³/s, son los años 1986 y 1982. El año 1982 presenta el mayor evento registrado en los datos y además, cuenta con los registros pluviométricos en las tres estaciones ya mencionadas, razón por la cual este se escoge como año para realizar la calibración de los parámetros en un modelo lluvia escorrentía. De acuerdo a la Tabla 7-28, este año presentó valores de lluvia por encima del promedio aunque no son estos los valores de precipitación más altos encontrados en las estaciones.

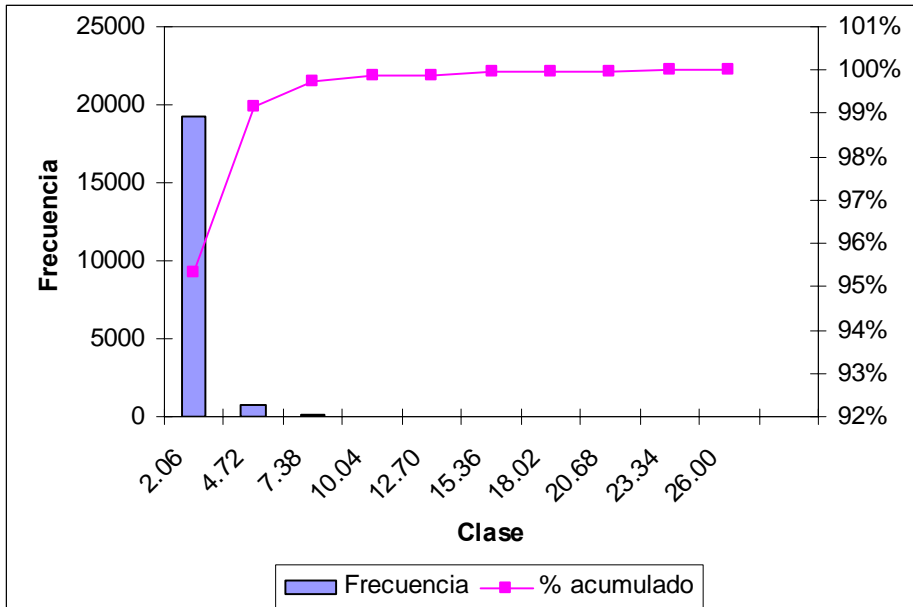


Figura 7-21. Frecuencias para los datos de caudal en la estación El Delirio

RANGOS DE CAUDAL (m ³ /s)	FRECUENCIA	% ACUMULADO
2.06	19211	95.33%
4.72	776	99.18%
7.38	116	99.75%
10.04	22	99.86%
12.70	7	99.90%
15.36	11	99.95%
18.02	1	99.96%
20.68	3	99.97%
23.34	4	99.99%
26.00	1	100.00%

Tabla 7-28. Análisis de frecuencias para los datos de caudales

La Figura 7-22 a Figura 7-24, muestran los datos de caudales de la estación limnigráfica El Delirio, confrontados con los datos de lluvia de las estaciones Vitelma, El Delirio y Palo Blanco, que como se mencionó anteriormente, están localizadas estratégicamente en la zona de estudio. Se puede ver, que existe una gran coherencia entre los datos de caudal y de lluvia especialmente en las estaciones Palo Blanco y el Delirio localizadas aguas arriba de la estación de medición de caudales.

Observando la Figura 7-22 que muestra los datos de la estación Palo Blanco, es posible ver, que el evento máximo de caudal (26.6 m³/s), está desfasado un día con respecto al valor de precipitación máxima en esta estación (30.1 mm), algo parecido ocurre en las estaciones El Delirio y Vitelma, que un día antes del evento de máximo caudal, presentaron valores de lluvia de 36.0 y 41.5 mm respectivamente. Más adelante, se revisará si existe coherencia en esta tendencia a partir de información más detallada y que corresponde a los registros del limnigrama en la estación de caudales El Delirio, y a los pluviogramas de las diferentes estaciones pluviográficas.

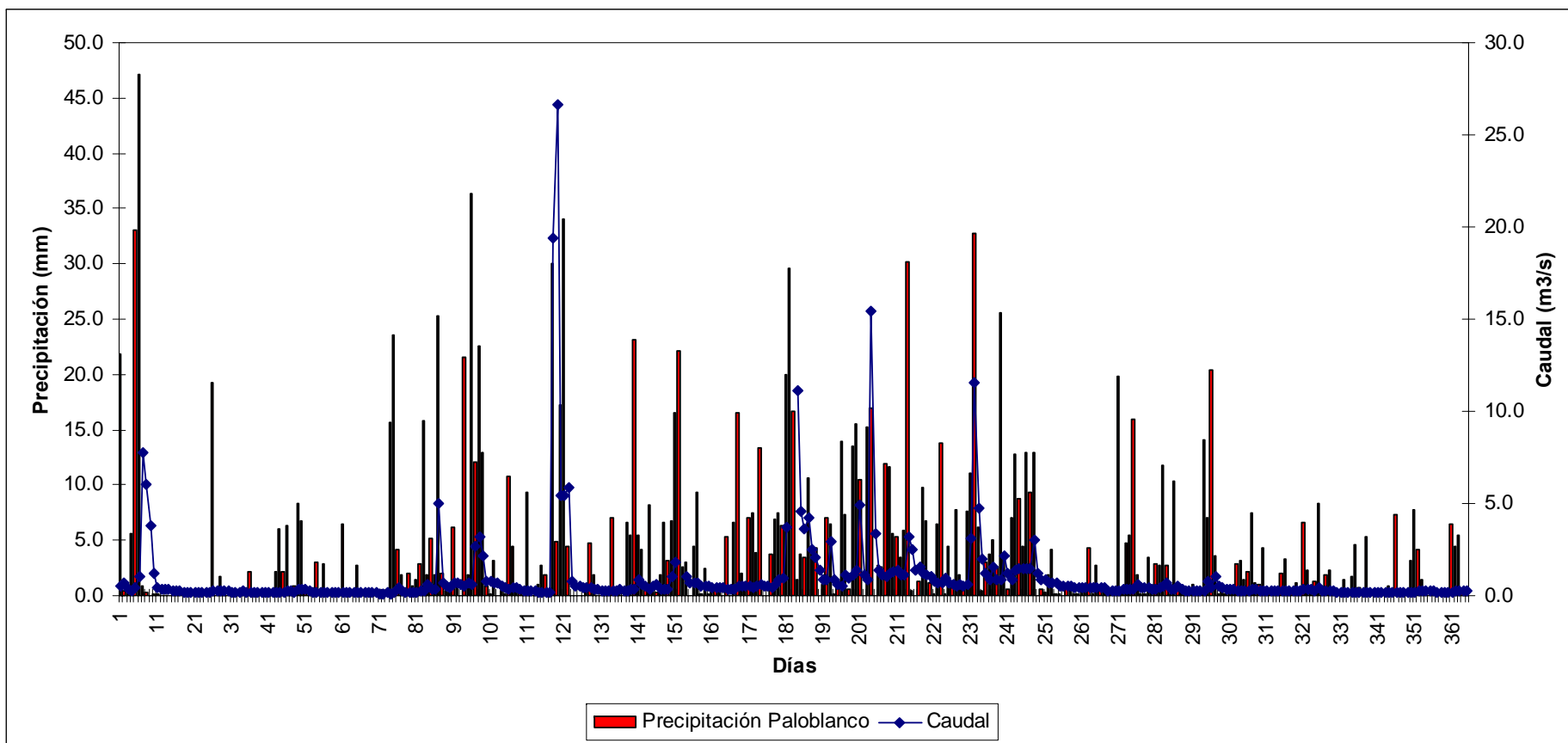


Figura 7-22. Datos de lluvias y caudales Estación Palo Blanco (1982)

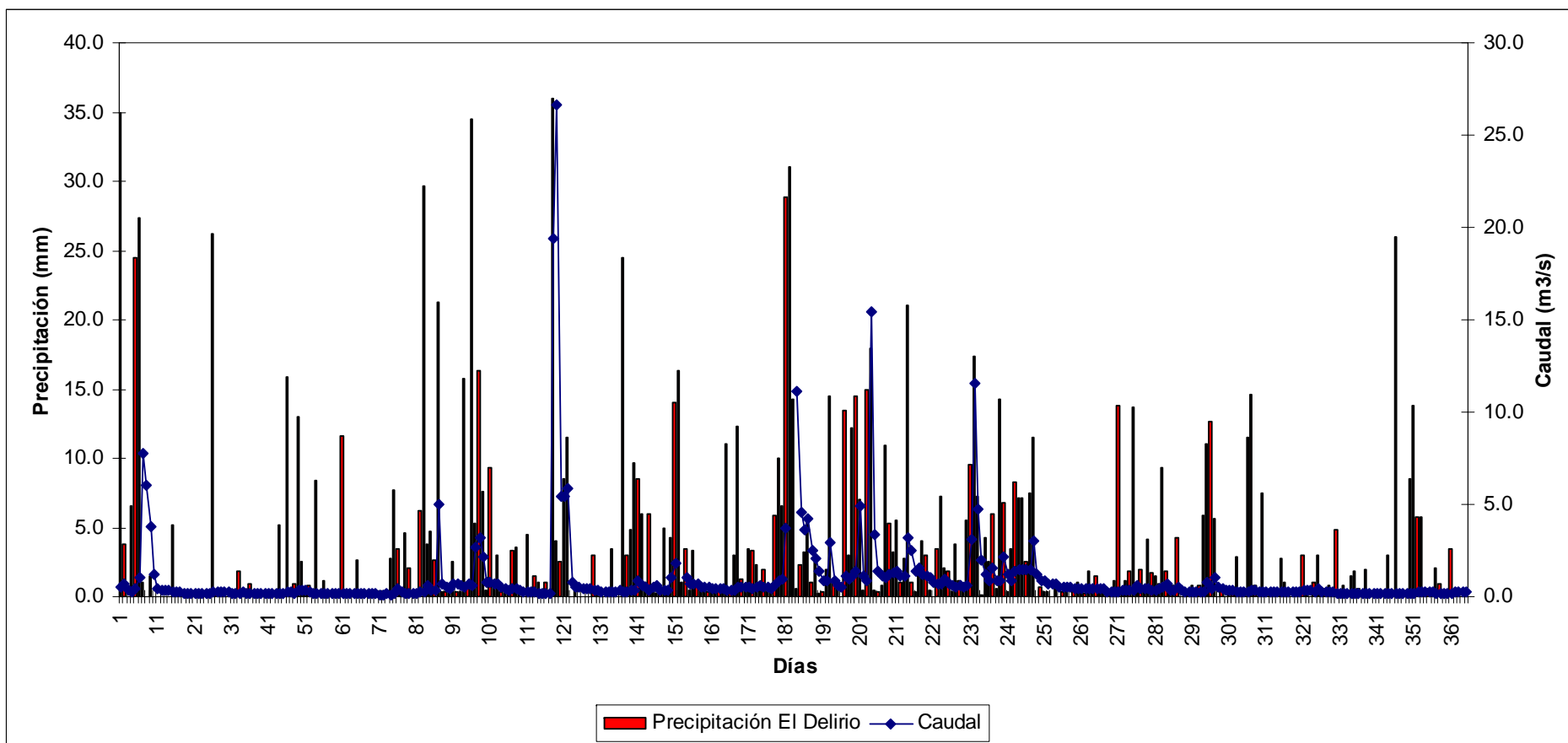


Figura 7-23. Datos de lluvias y caudales Estación El Delirio (1982)

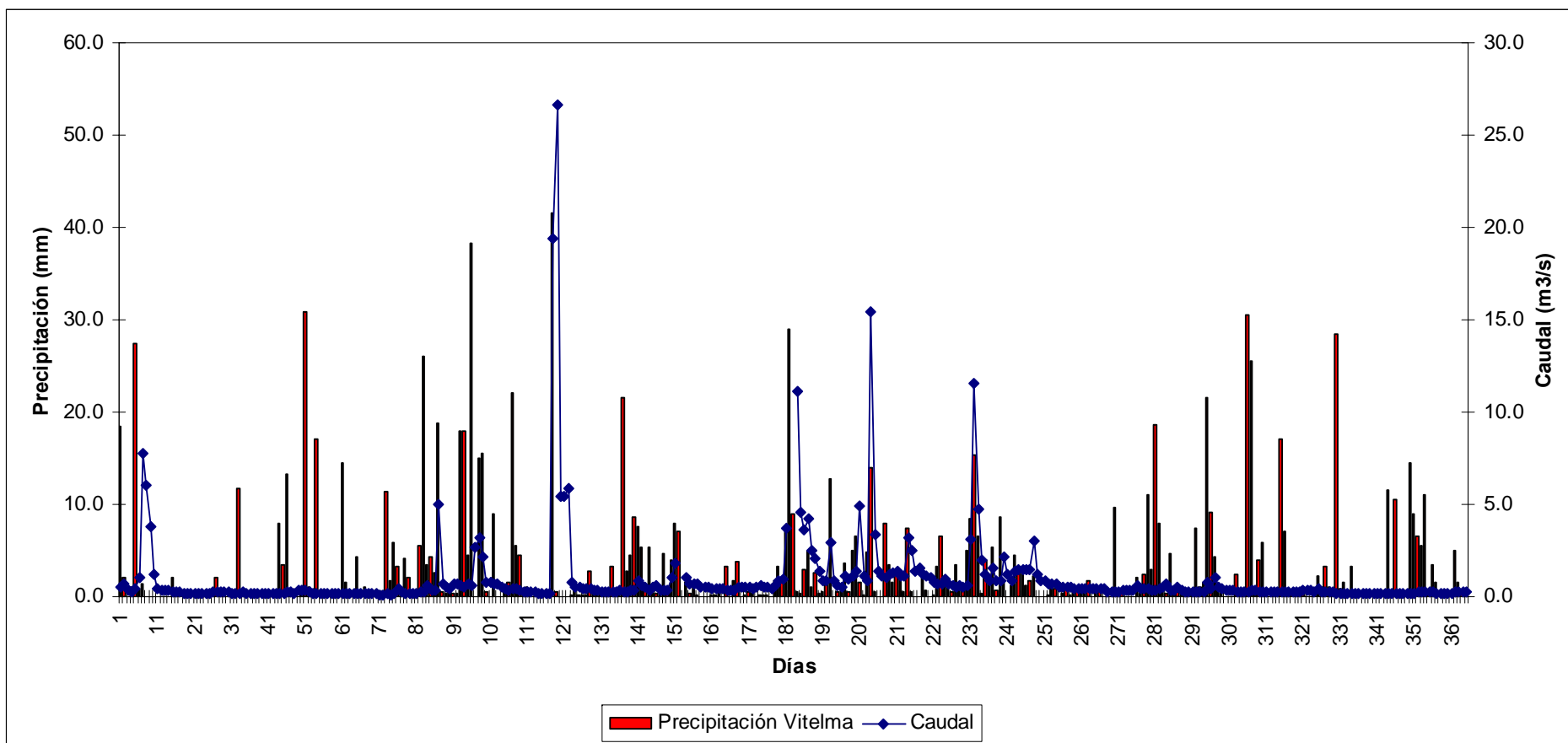


Figura 7-24. Datos de lluvias y caudales Estación Vitelma (1982)

7.5 Estimación de hidrogramas de caudal en la cuenca

7.5.1 Consideraciones generales para el cálculo de caudales

A continuación se presentan las consideraciones generales que se tuvieron en cuenta para la simulación de los hidrogramas de caudal en la cuenca alta del río San Cristóbal:

- Los hidrogramas de caudal en los diferentes elementos del sistema, se estimaron empleando el modelo hidrológico HEC – HMS (Hydrologic Modeling System) del Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos, El software realiza la simulación hidrológica de un evento lineal y semidistribuido, permitiendo estimar los hidrogramas de caudal en la salida de una cuenca o varias subcuencas, a partir de las condiciones de lluvia en la cuenca. El HEC-HMS fue empleado en esta investigación, ya que es un programa aceptado y reconocido mundialmente por la comunidad científica, y a su vez ha sido empleado para tales fines en múltiples proyectos.
- Para el cálculo de dichos hidrogramas, se empleó la metodología del hidrograma unitario (HU) del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, sin flujo base, y cuyo fundamento teórico, se presentó en el Capítulo 4.
- Las pérdidas o abstracciones se estimaron también empleando la metodología del SCS, que involucra el número de curva (CN) y que se describió en el Capítulo 4.
- El tránsito de la creciente por el canal del cauce principal del río, se estimó empleando el método de Muskingum – Cunge que considera las características geométricas del canal (longitud, pendiente, coeficiente de rugosidad de Manning, etc). Para este caso, y debido a las limitaciones del programa en cuanto a la forma de la sección del canal, se asumió un canal trapezoidal con un ancho máximo de 10 m en su base, y con un talud de inclinación lateral de las paredes de 1:3.
- Los pesos asignados a cada estación de acuerdo al área de cada subcuenca, se asignaron a partir de Polígonos de Thiessen, y corresponden a los valores presentados en la Tabla 7-25 de este capítulo.
- Se asigna un valor de área impermeable a cada una de las subcuencas, correspondiente al 10% de la misma, a fin de incluir aquellas zonas saturadas o cuerpos de agua que existan dentro de cada subárea de la zona de estudio.

- Se realizó la calibración de diferentes parámetros de las subcuencas, empleando como evento de calibración, el presentado el día 28 de abril de 1982, del cual se contó con el hidrograma de nivel obtenido de los archivos análogos de la Empresa de Acueducto de Bogotá encontrados en el Archivo Distrital de Bogotá D.C. de igual forma, se cuenta con la tormenta registrada en la estación pluviométrica El Delirio, y que se encontró en la base de datos del programa SISTORM de la Empresa de Acueducto de Bogotá.
- Los parámetros que se calibraron para las subcuencas fueron: El número de curva, el tiempo de retardo de la cuenca y las abstracciones iniciales. Para los tramos del canal principal, se calibró el coeficiente de rugosidad de Manning.
- Posterior a la calibración de parámetros, se simularon los hidrogramas de caudal para eventos de lluvia de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- La duración de las tormentas para estos periodos de retorno se asumió de 6 horas, puesto que de acuerdo a los registros encontrados en el programa SISTORM de la Empresa de Acueducto de Bogotá, las tormentas en la estación El Delirio, presentan duraciones por encima de las seis horas. Adicionalmente esta duración es la que presenta un mayor volumen de precipitación de acuerdo a las curvas IDF suministradas por la Empresa de Acueducto de Bogotá.
- El valor total de precipitación de cada una de las tormentas para los diferentes periodos de retorno, se obtuvieron de las curvas IDF de la estaciones El Delirio, Vitelma, La María, Juan Rey y Guadalupe, para la duración de 6 horas.

7.5.2 Información inicial disponible

La información requerida para estimar los hidrogramas de caudal en la cuenca, básicamente está conformada por la información de tormentas sobre la cuenca para el evento de calibración y para los diferentes períodos de retorno; también se requiere de los datos de las subcuencas como áreas, tiempos de retardo, números de curva y pérdidas iniciales.

Características de las subcuencas

Para un mayor detalle en los cálculos, la cuenca alta del río San Cristóbal, se subdividió en las subcuencas más importantes, a fin de poder estimar los hidrogramas de caudal en la confluencia de estos cauces con el cauce principal y

tener un buen conocimiento en cuanto aporte líquido y sólido al río. En la Figura 7-5 se mostró la subdivisión de la cuenca principal.

Los datos de cada una de estas subcuencas, se muestran en la Tabla 7-29, donde se presenta el área, el perímetro, y el tiempo de retardo de cada una de ellas.

NOMBRE	ÁREA m ²	PERÍMETRO m	TIEMPO DE RETARDO Minutos
El Soche	1007550	5802	15.8
El Triangulo	521955	6264	18.1
La Colorada	914607	5376	13.1
La Fotoga	618507	7974	28.6
La Mina	2165526	10068	23.9
La Osa	3562911	11094	23.9
La Osa Baja	121437	2022	9.6
La Pichosa	1419543	8838	24.9
La Upata	2903787	11016	35.5
Laureles	3170781	11532	33.1
Palo Blanco Alta	4431681	11526	21.9
Palo Blanco Alto Derecha	1850058	9204	31.4
Palo Blanco Medio	1782585	11016	20.4
PB-1	180450	2718	6.3
PB-3	552393	5118	10.7
PB-4	780309	6342	21.7
PB-4-2	243990	3186	9.1
Piedra Redonda	1217763	8280	34.2
Ramajal	2375418	8279	40.8
San Cristóbal	1995633	9234	17.2
Vitelma	641300	4141.28	10.0

Tabla 7-29. Información de las subcuencas

Estimación del número de curva de cada una de las subcuencas

Para estimar los números de curva de cada una de las subcuencas, se empleó la información de cobertura y usos del suelo, y la geología de la cuenca, información actualizada por La Universidad Nacional en el marco de este proyecto. Para cada una de las coberturas y usos del suelo, se asignó un número de curva de acuerdo al cuadro presentado por Ven Te Chow.

La Tabla 7-30 muestra el número de curva asignado a cada cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca, para cada tipo o clasificación hidrológica del suelo (clasificación que de acuerdo a la metodología del SCS es A, B, C ó D).

CÓDIGO	CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA DEL SUELO	A	B	C	D
1	Suelo Desnudo	49	69	79	84
2	Rastrojo	77	86	91	94
4	Ciprés	25	55	70	77
5	Pastos	39	61	74	80
6	Eucalipto y Pino	25	55	70	77
8	Construcción	77	85	90	92
11	Frailejón y Pajonal	39	61	74	80

Tabla 7-30. Número de curva para cada cobertura vegetal y uso en la cuenca

En la Figura 7-25. se muestran las diferentes coberturas y usos del suelo en la cuenca; aquí se puede apreciar, que gran parte de la cuenca en su parte alta, presenta una cobertura de eucalipto y pino, al igual que frailejones y pajonales. Las zonas construidas predominan en la parte baja de la cuenca, siendo estas las que presentan el mayor número de curva, que implica una baja infiltración.

De igual forma, de acuerdo a la clasificación geológica, se asignó a cada formación, un grupo hidrológico de suelo; tal resumen se muestra en la Tabla 7-31., y la Figura 7-26. explica cada una de las clasificaciones geológicas en la cuenca.

CÓDIGO	CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA	CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DEL SUELO
1	Qc	C
2	Qrc	A
3	Qrt	A
4	TQt	B
5	Tib	A
6	Tic	C
7	TKg	C
8	Ksgt	A
9	Ksgl	B
10	Ksgp	B
11	Ksgd	C
12	Ksch	C

Tabla 7-31. Grupo hidrológico del suelo para cada formación geológica

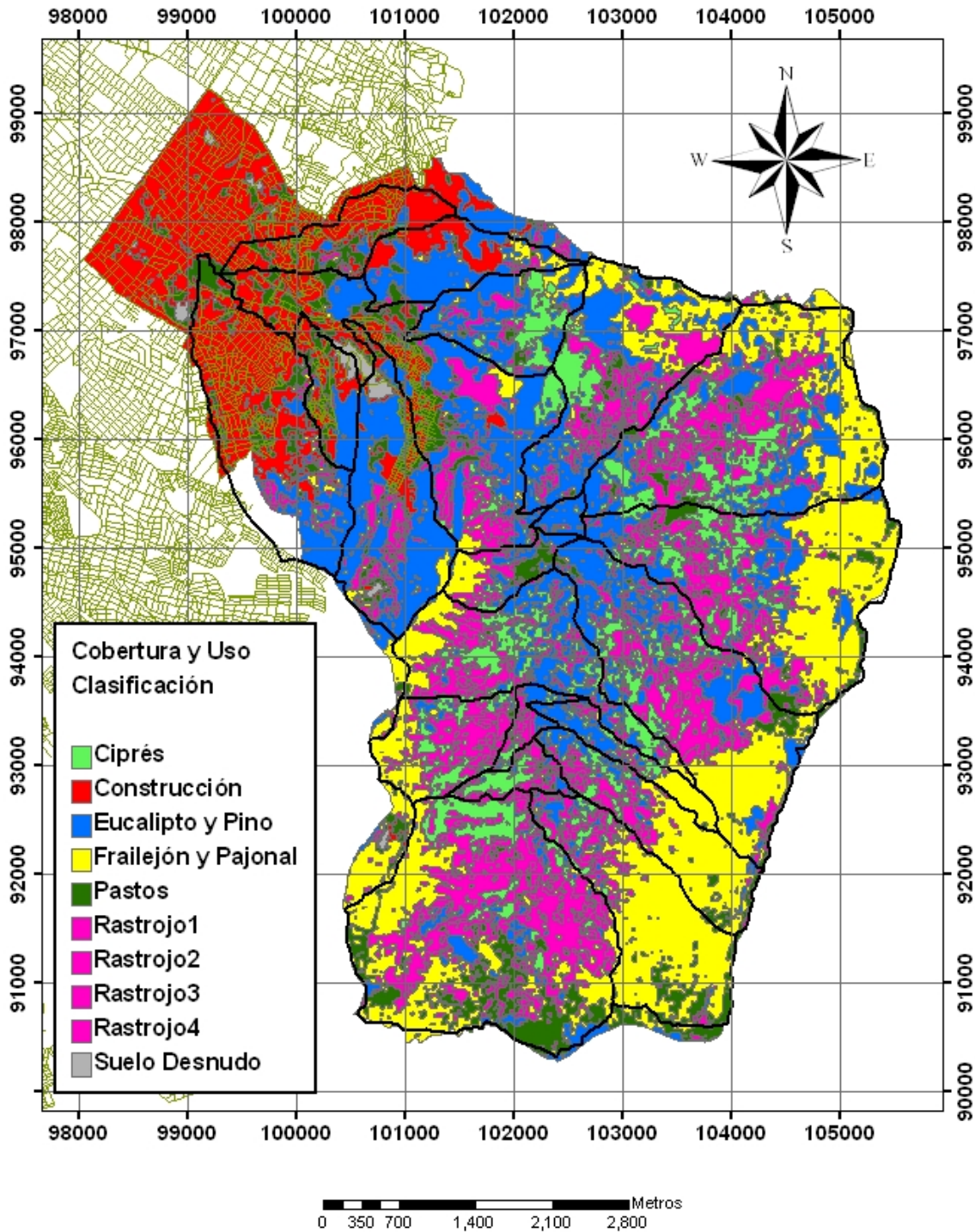


Figura 7-25. Información de cobertura y usos del suelo (Universidad Nacional de Colombia, 2007)

Teniendo en cuenta, la información mencionada de cobertura y usos del suelo con su respectivo número de curva, y la clasificación hidrológica de suelos, se puede obtener el número de curva de forma discreta para toda la cuenca del río San Cristóbal. Esta información se procesó empleando el subprograma HEC-GEO HMS del cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, el cual permite el procesamiento de la información empleando el sistema de información geográfico ARC-VIEW 3.2. La Tabla 7-32 muestra los números de curva para toda la cuenca. Aquí se puede apreciar, que el rango de números de curva en la cuenca va desde 25 en la parte alta de la misma, hasta 91 que corresponde a la parte urbana en la parte baja. También se puede apreciar que gran parte de la cuenca presenta un número de curva de 70.

NOMBRE	NÚMERO DE CURVA
El Soche	65.00
El Triangulo	76.00
La Colorada	82.00
La Fotoga	71.00
La Mina	77.00
La Osa	76.00
La Osa Baja	72.00
La Pichosa	73.00
La Upata	71.00
Laureles	68.00
Palo Blanco Alta	80.00
Palo Blanco Alto Derecha	72.00
Palo Blanco Medio	77.00
PB-1	83.00
PB-3	77.00
PB-4	72.00
PB-4-2	74.00
Piedra Redonda	65.00
Ramajal	67.00
San Cristóbal	76.00
Vitelma	81.00

Tabla 7-32. Número de curva para cada subcuenca

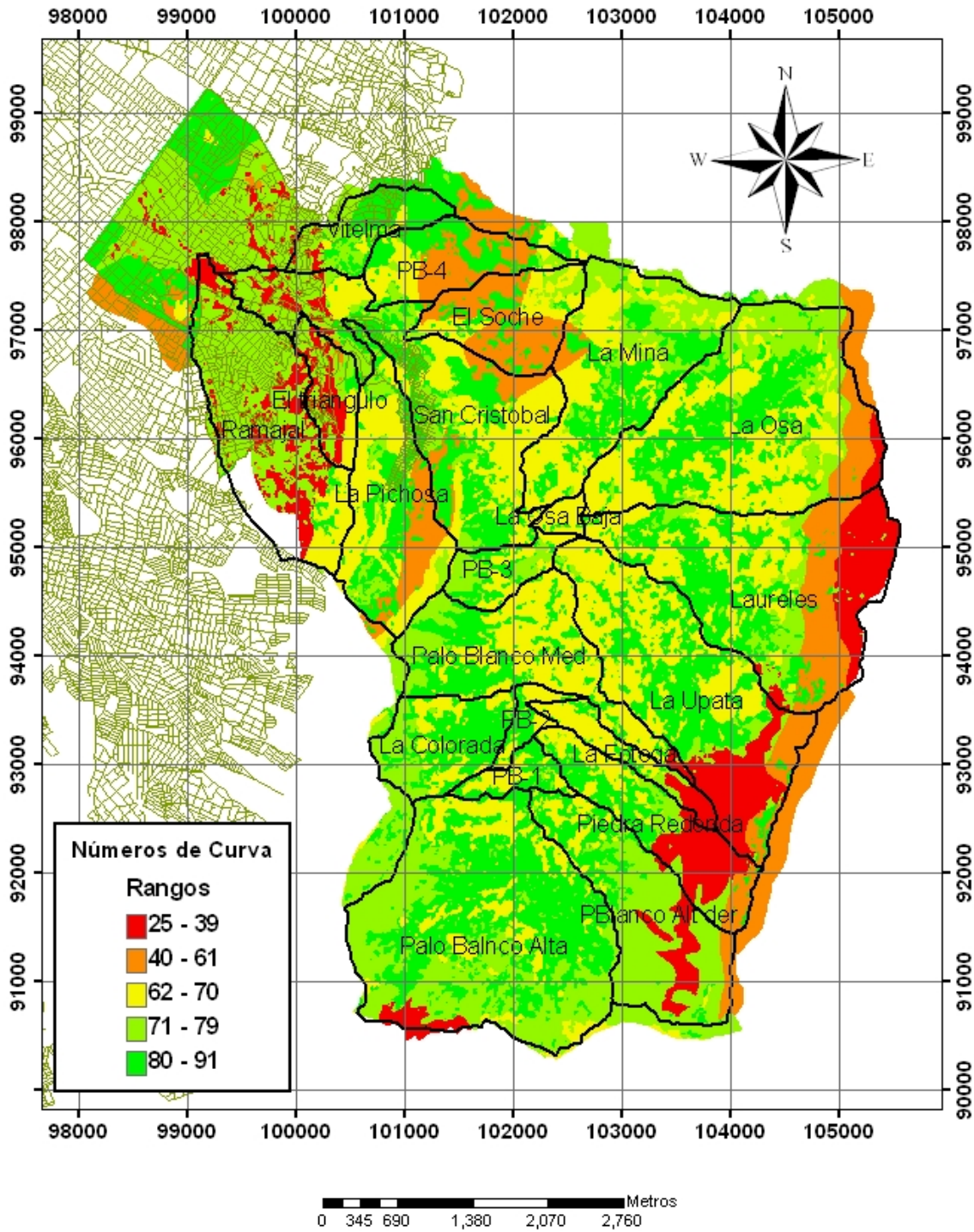


Figura 7-27. Números de curva estimados en la cuenca

En términos generales, para cada una de las subcuencas, se estimó el número de curva promedio, obteniendo los valores del CN que se presentan en la Tabla 7-32.

Eventos de caudal y lluvia máxima de acuerdo a los registros diarios

La selección del evento para la calibración de parámetros en el modelo lluvia escorrentía, se llevó a cabo, buscando en las series de datos de registros de caudal medio diario, y precipitación total diaria. Inicialmente se seleccionaron aquellos días que tuviesen valores de caudal por encima de 15 m³/s (en la serie de datos este valor es superado en 15 registros), y valores de precipitación superiores a 40 mm en las estaciones El Delirio y Paloblanco (Tabla 7-33).

Observando dichos registros de precipitación diaria, se encontró que el valor máximo de precipitación en la estación El Delirio fue de 115.60 mm, día en el cual el valor de caudal no superó los 10 m³/s. De igual forma, en la estación Paloblanco, el valor máximo registrado fue de 87.0 mm, con un caudal de 2.3 m³/s. Estos eventos extremos, no se tuvieron en cuenta puesto que no presentaba coherencia entre los datos de caudal y lluvia, adicionalmente no se encontró para estas fechas, el limnigrama en la estación El Delirio.

En cuanto a los datos de caudal medio diario en la estación limnigráfica El Delirio, se encontró que el valor máximo fue de 26.60 m³/s y que ocurrió el día 29 de abril de 1982, siendo los valores de precipitación para ese día muy bajos comparados con los del día anterior. Debido a esta inconsistencia, se optó por revisar el limnigrama de los días 28, 29 y 30 de abril de dicho año, a fin de corroborar la calidad de la información.

Dicho limnigrama que se muestra en la Figura 7-28 muestra que las alturas máximas se alcanzaron el día 28 de abril, y no el día 29 como se interpretaría de los datos diarios.

Al tener el limnigrama del día 28, que adicionalmente presentaba los registros de la tormenta en la estación pluviográfica El Delirio, se tomó la decisión de calibrar con este evento, el modelo lluvia – escorrentía para la cuenca. Los demás eventos mostrados en la Tabla 7-33, en muchos de los casos no presentaban tal información de forma completa, es decir, fue difícil encontrar simultáneamente los hidrogramas de caudal para eventos extremos junto con los datos de las tormentas asociadas a dichos eventos; esta inconsistencia se presenta debido a que para muchos de estos eventos, y de acuerdo a los registros encontrados en el archivo Distrital de Bogotá, el aparato de medición por uno u otro motivo, no pudo registrar la creciente.

Este inconveniente mencionado, no permitió calibrar el modelo lluvia – escorrentía para diferentes escenarios de lluvia antecedente, y tampoco permitió la validación de los parámetros calibrados, con otro evento con similares características.

DÍA	MES	AÑO	CAUDAL (m ³ /s)	PRECIPITACIÓN EL DELIRIO	PRECIPITACIÓN PALOBLANCO	PRECIPITACIÓN VITELMA
				(mm)		
30	7	1953	6.0	33.5	46.0	21.0
3	7	1954	6.1	26.9	57.0	0.0
2	7	1959	4.8	10.9	79.5	60.0
5	8	1960	13.9	35.1	62.0	44.0
22	4	1961	4.7	3.8	40.0	28.0
14	8	1961	10.1	33.4	48.0	7.0
3	6	1962	5.1	43.2	51.0	18.0
3	8	1962	11.4	37.0	54.0	11.5
21	11	1962	8.0	60.2	43.0	36.0
13	12	1962	5.7	20.8	43.0	0.0
28	7	1964	5.8	21.3	42.0	
6	4	1965	2.3	22.2	87.0	18.0
14	10	1965	4.3	25.2	59.0	48.3
27	11	1966	10.3	47.4	48.0	0.0
4	12	1966	9.1	115.6	7.0	10.0
4	8	1967	5.9	56.2	54.0	6.0
3	11	1967	6.7	7.6	42.0	7.0
12	11	1967	11.6	29.6	54.0	8.0
26	7	1968	5.8	24.9	42.0	2.0
29	7	1968	18.5	45.8	37.0	22.0
5	10	1970	5.0	45.2	3.0	10.0
6	10	1970	5.9	1.2	56.0	0.0
26	10	1970	7.7	34.2	54.0	10.0
5	11	1970	5.9	71.0	0.0	9.0
12	6	1971	4.7	43.8	43.0	34.2
1	7	1972	13.4	42.8	42.0	26.0
24	3	1974		102.8	82.0	8.3
7	7	1974	6.0	32.6	40.0	16.6
16	12	1975	5.1	56.6	45.4	5.2
13	5	1976	5.3	14.6	45.3	17.4
24	6	1978	8.2	19.6	49.4	6.1
10	6	1980	22.8	3.0	60.3	36.5
28	4	1982	19.4	36.0	30.1	41.5
29	4	1982	26.6	4.0	4.9	0.5
23	7	1982	15.4	17.9	17.0	14.0
30	5	1985	19.5	16.5		6.4
3	7	1986	15.0	5.2		
4	7	1986	15.0	2.6		0.4

DÍA	MES	AÑO	CAUDAL (m ³ /s)	PRECIPITACIÓN EL DELIRIO	PRECIPITACIÓN PALOBLANCO	PRECIPITACIÓN VITELMA
				(mm)		
5	7	1986	15.0	7.1		0.0
6	7	1986	15.0	18.1		2.4
22	7	1986	14.8	46.0		
15	7	1996	21.9	54.0		18.8
16	7	1996	22.7	57.0		23.5
17	7	1996	23.6	17.0		20.0
18	7	1996	21.9	12.0		12.3
13	11	1997	3.8	62.0		12.5
29	10	1999	4.0	64.0		8.5
29	5	2002	3.6	48.2		60.8
1	12	2003	3.6	51.7		35.3
22	5	2005	8.1	57.5		45.4

Tabla 7-33. Datos de eventos máximos de lluvia y caudal

Hidrograma de caudal para la calibración del modelo lluvia - escorrentía

Como se mencionó anteriormente, el evento para la calibración correspondió al presentado el día 28 de abril de 1982. De este evento, se obtuvo el registro limnigráfico, del cual, empleando la curva de calibración de la estación limnigráfica El Delirio, se obtuvo el hidrograma de caudal que se muestra en la Figura 7-28.

Este hidrograma presenta un caudal pico de 25.33 m³/s presentado a las 3:30 de la tarde de dicho día. El caudal base, oscila en un valor entre 0.42 y 0.50 m³/s.

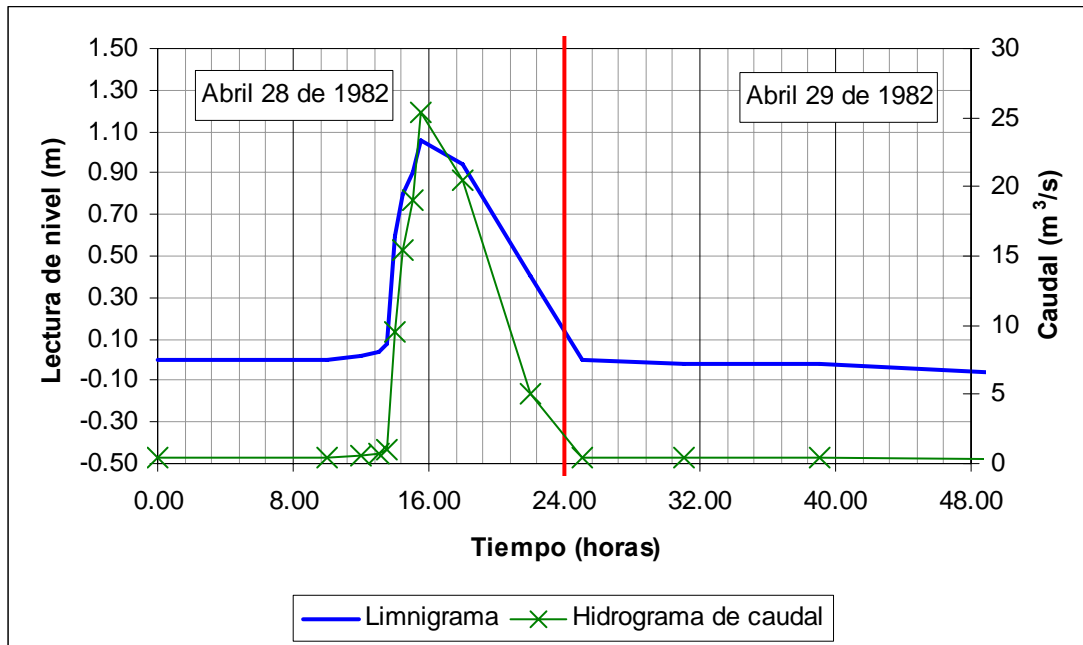


Figura 7-28. Lectura de niveles – abril 28 y 29 de 1982

En este hidrograma se puede apreciar, que el caudal base para este evento, oscila entre 0.42 y 0.50 m³/s, que corresponde aproximadamente al 1.6% del valor pico presentado en este día. Esto indica, que para efectos de los análisis hidrológicos, se puede despreciar el caudal base dada la gran diferencia entre dicho valor y el pico correspondiente. La Figura 7-29. muestra el hidrograma empleado para la calibración del modelo lluvia escorrentía quitando el caudal base que se asumió igual a 0.42 m³/s.

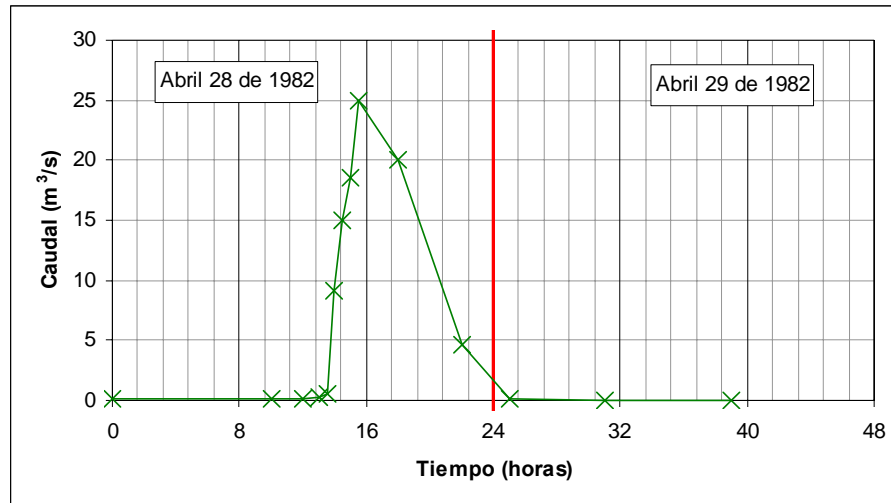


Figura 7-29. Hidrograma de escorrentía directa – abril 28 y 29 de 1982

Tormenta para el evento de calibración

La información de las tormentas en la cuenca, se tomó de los registros encontrados en el programa SISTORM, de la Empresa de Acueducto de Bogotá. Aquí se encontró que para el día del evento de calibración, se presentó una tormenta cuyo volumen total de precipitación fue de 34.5 mm, con una duración de 355 minutos (6 horas aproximadamente). Dicha tormenta, se presenta en la Figura 7-30.

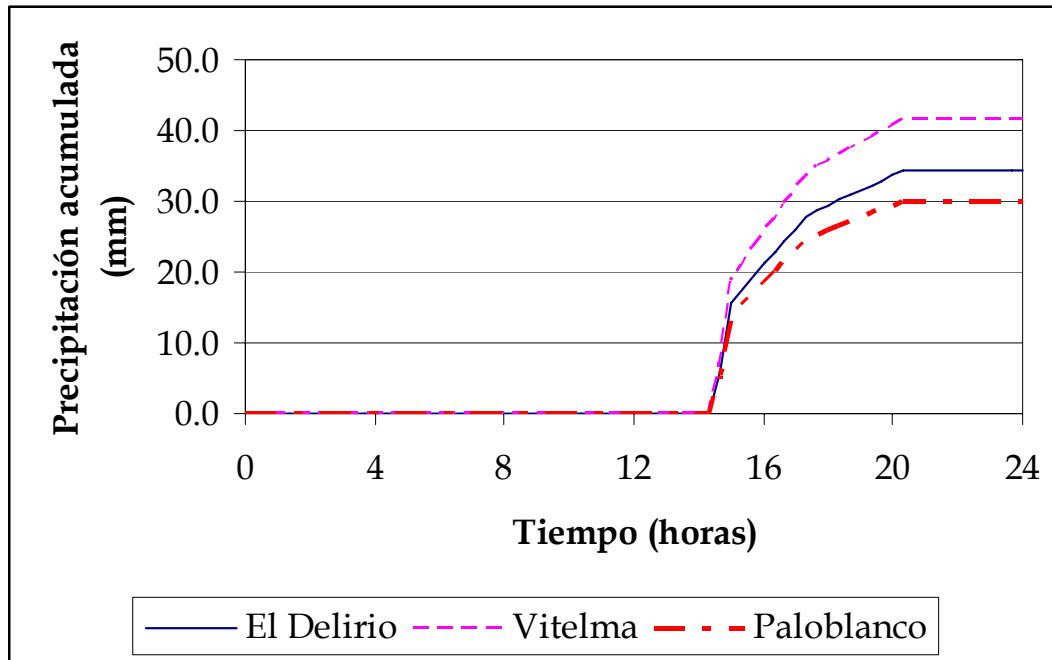


Figura 7-30. Tormenta – abril 28 de 1982

Como no se posee información acerca de la distribución temporal de las tormentas en las otras estaciones (Paloblanco, Vitelma, Juan rey y Guadalupe) se asume que la distribución temporal es igual para todas las estaciones, tomando como volumen total de precipitación, el valor de precipitación total diaria de cada estación en ese día, y que se presenta en la Tabla 7-34. en donde se muestran las tormentas en las diferentes estaciones. Para la estación Juan Rey que no posee información para esta fecha, se le asignará la misma tormenta de la estación Paloblanco, de igual forma, a la estación Guadalupe se le asignará la tormenta de la estación El Delirio.

HORA	EL DELIRIO	VITELMA	PALOBLANCO	GUADALUPE	JUAN REY
	PRECIPITACIÓN ACUMULADA (mm)				
14.7	6.0	7.3	5.3	6.0	5.3
15.0	15.5	18.7	13.6	15.5	13.6
15.3	17.4	21.0	15.2	17.4	15.2
15.7	19.3	23.3	16.9	19.3	16.9
16.0	21.2	25.6	18.6	21.2	18.6
16.3	22.8	27.6	20.0	22.8	20.0
16.7	24.4	29.6	21.4	24.4	21.4
17.0	26.1	31.5	22.9	26.1	22.9
17.3	27.7	33.5	24.3	27.7	24.3
17.7	28.8	34.9	25.3	28.8	25.3
18.0	29.5	35.7	25.9	29.5	25.9
18.3	30.2	36.5	26.5	30.2	26.5
18.7	30.9	37.4	27.1	30.9	27.1
19.0	31.6	38.2	27.7	31.6	27.7
19.3	32.3	39.0	28.3	32.3	28.3
19.7	33.0	39.8	28.9	33.0	28.9
20.0	33.6	40.7	29.5	33.6	29.5
20.3	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
20.7	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
21.0	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
21.3	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
21.7	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
22.0	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
22.3	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
22.7	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
23.0	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
23.3	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
23.7	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1
24.0	34.3	41.5	30.1	34.3	30.1

Tabla 7-34. Datos de tormenta para el evento del 28 de abril de 1982

Tormenta para eventos con diferentes periodos de retorno

De los datos encontrados en el programa SISTORM, se tomó como patrón de distribución temporal de la tormenta, la correspondiente al evento registrada en la estación El Delirio el 4 de diciembre de 1966 cuya forma se muestra en la Figura 7-31, y la cual se asumirá igual para todas las estaciones para una duración de tormenta de 6 horas (la tormenta del 4 de diciembre de 1966 duró aproximadamente 355 minutos, con un valor de precipitación acumulada de 73 mm). La tormenta de dicho día se normalizó dividiendo la precipitación acumulada en el total registrado, y se empleó para cada estación asumiendo que el volumen total de precipitación es igual al estimado a partir de las curvas IDF en cada una de las estaciones para una duración de 6 horas.

En este estudio se estimaron los hidrogramas de caudal empleando tormentas con duración 2 horas, y para la cual se tomaron los datos de la tormenta del 11 de abril de 1963 cuya duración fue de 130 minutos, con una precipitación acumulada de 32 mm. La distribución de dicha tormenta se presenta en la Figura 7-32.

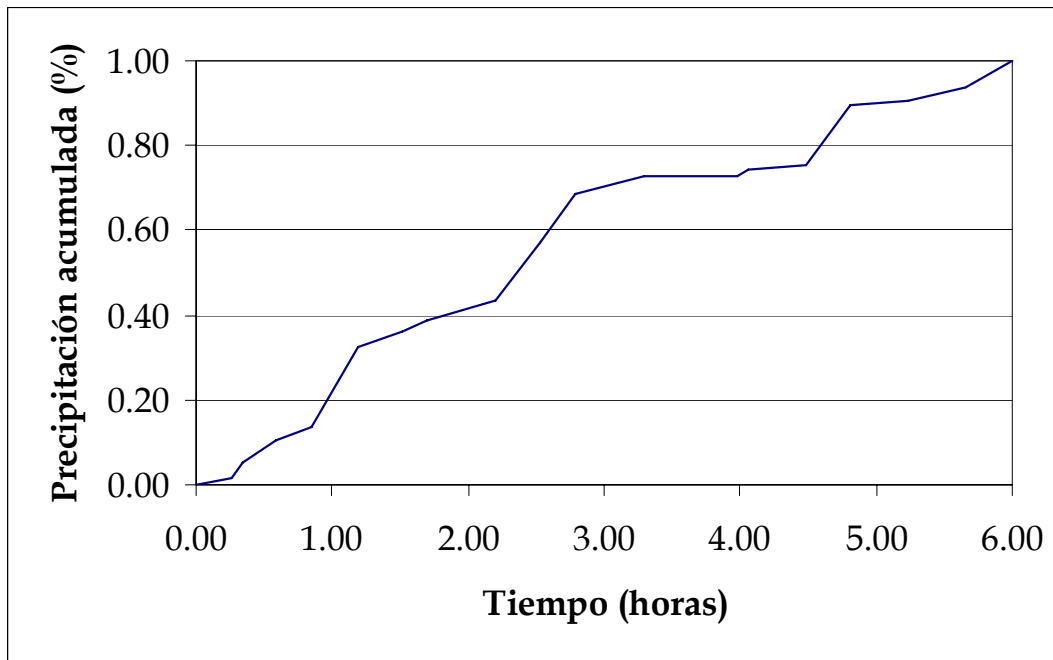


Figura 7-31. Tormenta para diferentes periodos de retorno (evento del 4 de diciembre de 1966)

FECHA	HORA	PRECIPITACIÓN ACUMULADA	PORCENTAJE DE TIEMPO (%)	HORAS	PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN (%)
Tormenta del 4 de diciembre de 1966			Tormenta para diferentes períodos de retorno		
04/12/1966	1745	0.0	0.00	0.00	0.00
04/12/1966	1800	1.0	0.04	0.25	0.01
04/12/1966	1805	3.8	0.06	0.34	0.05
04/12/1966	1820	7.8	0.10	0.59	0.11
04/12/1966	1835	10.0	0.14	0.85	0.14
04/12/1966	1855	23.6	0.20	1.18	0.32
04/12/1966	1915	26.4	0.25	1.52	0.36
04/12/1966	1925	28.2	0.28	1.69	0.39
04/12/1966	1955	31.8	0.37	2.20	0.44
04/12/1966	2015	41.4	0.42	2.54	0.57
04/12/1966	2030	49.8	0.46	2.79	0.68
04/12/1966	2100	52.8	0.55	3.30	0.73
04/12/1966	2140	53.0	0.66	3.97	0.73
04/12/1966	2145	54.0	0.68	4.06	0.74
04/12/1966	2210	54.8	0.75	4.48	0.75
04/12/1966	2230	65.0	0.80	4.82	0.89
04/12/1966	2255	66.0	0.87	5.24	0.91
04/12/1966	2320	68.4	0.94	5.66	0.94
04/12/1966	2340	72.8	1.00	6.00	1.00

Tabla 7-35. Datos de tormenta para diferentes períodos de retorno (duración 6 horas)

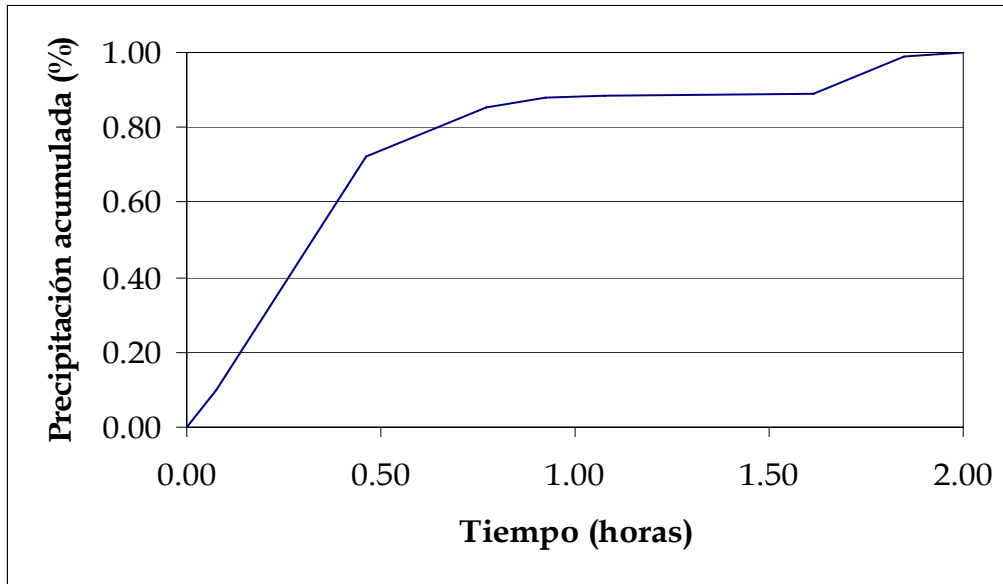


Figura 7-32. Tormenta para diferentes periodos de retorno (evento del 11 de abril de 1963)

FECHA	HORA	PRECIPITACIÓN ACUMULADA	PORCENTAJE DE TIEMPO (%)	HORA	PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN (%)
11/04/1963	1230	0.0	0.00	0.00	0.00
11/04/1963	1235	3.2	0.04	0.08	0.10
11/04/1963	1300	22.8	0.23	0.46	0.72
11/04/1963	1320	27.0	0.38	0.77	0.85
11/04/1963	1330	27.8	0.46	0.92	0.88
11/04/1963	1340	28.0	0.54	1.08	0.89
11/04/1963	1415	28.2	0.81	1.62	0.89
11/04/1963	1430	31.2	0.92	1.85	0.99
11/04/1963	1440	31.6	1.00	2.00	1.00

Tabla 7-36. Datos de tormenta para diferentes periodos de retorno (duración 2 horas)

Se asumió en los análisis las duraciones de 2 y 6 horas, debido a que de acuerdo a las tormentas registradas en el programa SISTORM de la Empresa de Acueducto de Bogotá, donde aparecen registradas 509 tormentas entre los años 1961 y 1994 en la estación El Delirio, el 38% de los eventos se encuentran en este rango. En la Tabla 7-37 se presentan los rangos de duraciones de tormentas en la estación El Delirio; aquí se puede apreciar, que un alto porcentaje de los registros se encuentran en el rango entre 120 y 360 minutos, seguido a las tormentas con duraciones entre 60 y 120 minutos.

RANGO	NÚMERO DE TORMENTAS	PORCENTAJE DEL TOTAL DE TORMENTAS
> 2000 min	2	0.4
1000 a 2000 min	9	2
500 a 1000 min	54	10.6
360 a 500 min	38	7
300 a 360 min	28	6
120 a 360 min	192	38
60 a 120 min	123	24
< 60 min	63	12
Total		100

Tabla 7-37. Rangos de duraciones de tormentas en la estación El delirio

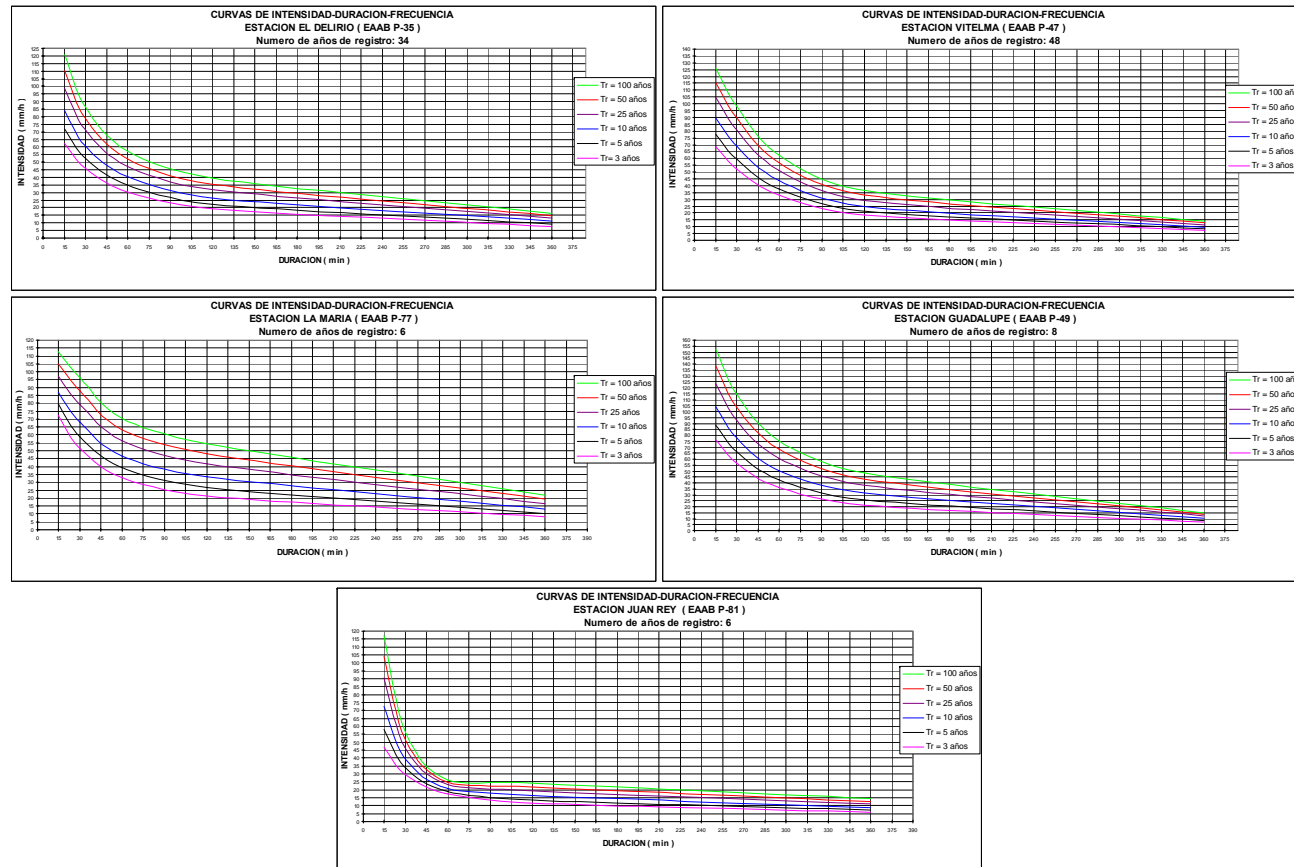


Figura 7-33. Curvas Intensidad– Duración Frecuencia (IDF). Fuente: Empresa de Acueducto de Bogotá, INGETEC S.A., 2006

Las curvas intensidad – duración – frecuencia, en las diferentes estaciones empleadas en este análisis, fueron obtenidas del estudio actualizado de caracterización de tormentas en la Sabana de Bogotá, realizado por la firma consultora INGETEC. Las curvas empleadas, se muestran en la Figura 7-33.

EL DELIRIO

P-35

MINUTOS	Tr = 2.33 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	57.3	62.4	71.9	83.8	98.9	110.1	121.2
30	42.3	45.9	52.5	60.8	71.2	79	86.7
60	28.3	30.6	35	40.4	47.3	52.3	57.4
120	17.3	19.1	22.4	26.5	31.7	35.6	39.4
360	7	7.7	9.1	10.9	13.1	14.7	16.4

VITELMA

P-47

MINUTOS	Tr = 2.33 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	63.5	68.5	77.8	89.5	104.3	115.3	126.2
30	48.3	52.4	59.8	69.2	81	89.8	98.5
60	30.6	33.2	37.9	43.8	51.2	56.7	62.2
120	16.9	18.4	21.3	24.9	29.5	32.9	36.3
360	6.5	7.1	8.2	9.7	11.5	12.8	14.2

LA MARIA

P-77

MINUTOS	Tr = 2.33 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	68.67	72.21	79.73	86.92	97.27	104.95	112.58
30	47.59	51.5	58.72	67.78	79.23	87.73	96.17
60	30	33.24	39.21	46.71	56.2	63.23	70.21
120	18.47	21.36	26.69	33.39	41.86	48.13	54.37
360	6.85	8.07	10.31	13.12	16.68	19.32	21.94

GUADALUPE

P-49

MINUTOS	Tr = 2.33 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	69.2	75.9	88.2	103.8	123.4	137.9	152.4
30	51.6	56.7	66.2	78	93	104.1	115.1
60	32.7	36.1	42.6	50.6	60.8	68.3	75.8
120	19.1	21.5	25.8	31.3	38.2	43.4	48.5
360	6.7	7.4	8.6	10.2	12.1	13.6	15.1

JUAN REY

P-81

MINUTOS	Tr = 2.33 años	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	40.8	46.9	58.3	72.5	90.5	103.9	117.1
30	27	29.4	33.7	39.2	46	51.2	56.2
60	16.9	17.6	19	20.8	23	24.7	26.3
120	10.6	11.7	13.7	16.3	19.4	21.8	24.1
360	5	5.8	7.2	8.9	11.2	12.8	14.5

Tabla 7-38. Datos curvas IDF

Condición antecedente para el evento de calibración

De acuerdo a los registros de lluvia diaria en las diferentes estaciones empleadas en este estudio, la lluvia antecedente al evento del 28 de abril de 1982 en la estación El Delirio, no supera 15 mm., en diez días antes del evento; de igual forma, en las estaciones Paloblanco y Vitelma, este valor de lluvia antecedente es de 15.6 y 13.0 mm., diez días antes del evento, respectivamente.

Esto indica, que el número de curva, que es uno de los parámetros a calibrar, tendrá una condición antecedente AMC-1.

7.5.3 Simulación de caudales con el modelo HC-HMS

Los hidrogramas de caudal para una creciente en la cuenca alta del río San Cristóbal, se determinaron con el modelo HEC – HMS (Hydrologic Modeling System) del Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos, el cual puede determinar dichos hidrogramas empleando diferentes metodologías de cálculo.

Este modelo está diseñado para simular la escorrentía superficial que resulta de una precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema de componentes interconectados. Cada componente modela un aspecto del proceso lluvia-escorrentía dentro de una subcuenca o subárea; los componentes incluyen la escorrentía superficial de la subcuenca, los canales y los embalses.

- Elemento Subcuenca o subárea: En este elemento, a partir de los datos meteorológicos (en este estudio se empleo solamente la lluvia), se realiza el balance hídrico descontando las pérdidas de agua por infiltración, y se

transforma el exceso de precipitación en escorrentía superficial con la posibilidad de trabajar con y sin flujo base.

- Tramo del cauce o canal: esquematiza el comportamiento de un canal, con la posibilidad de recibir uno o varios flujos de entrada dando lugar a un solo flujo de salida.
- Nodos o Confluencias: reciben uno o varios flujos entrantes y dan lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente de ríos o canales, con la posibilidad de obtener también, flujos entrantes procedentes de subcuencas.

Cada componente se representa por un conjunto de parámetros que especifica las características particulares del componente y las relaciones matemáticas que describen sus procesos físicos. Los resultados finales del proceso de modelación son los hidrogramas de escorrentía directa para varias subáreas y los hidrogramas de caudal en lugares predeterminados de la cuenca.

Es posible también simular el comportamiento de salidas de flujo en el sistema de drenaje, como es el caso de los puntos donde se extrae caudal a partir de bombeo. También, el modelo es capaz de simular el comportamiento en tanques de almacenamiento.

7.5.4 Resultados de la calibración del modelo lluvia - escorrentía

La calibración del modelo lluvia – escorrentía, se llevo a cabo empleando el modelo HEC-HMS, utilizando en principio, las diferentes funciones objetivo que presenta el software, para finalmente trabajar con el error medio cuadrático para el valor de caudal pico (RMS). La Figura 7-34 muestra el esquema presentado por el software HEC-HMS, de las subcuencas empleadas para el análisis.

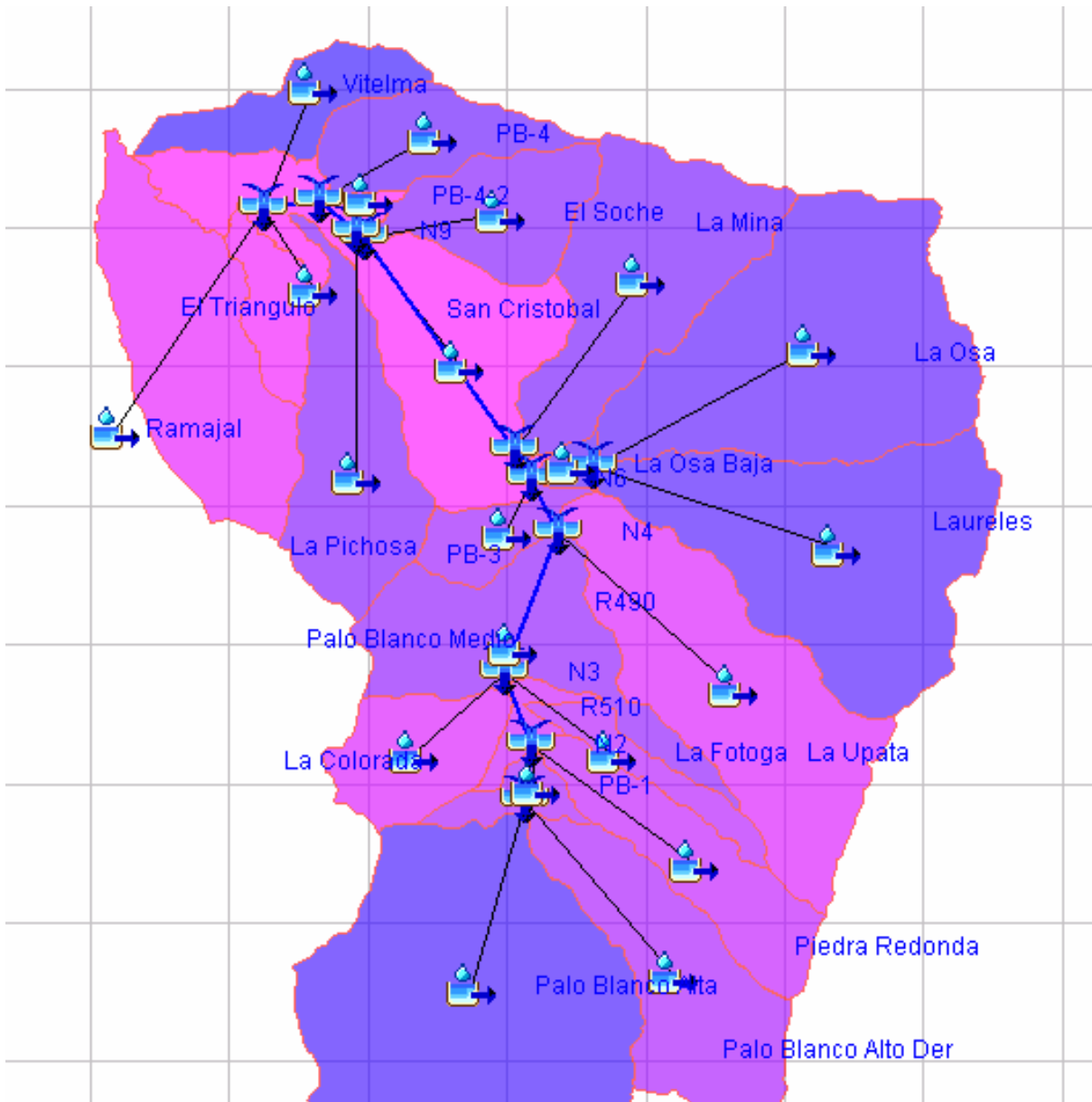


Figura 7-34. Esquema de subcuencas en el HEC-HMS

En la Figura 7-35 se presenta la comparación entre el hidrograma simulado para el evento de calibración, y el observado. Aquí se puede apreciar, que hay una muy buena correspondencia entre el valor pico de ambas hidrografas, contrario a lo que ocurre con el volumen total del flujo, en cuyo caso el valor observado es mayor al valor calculado.

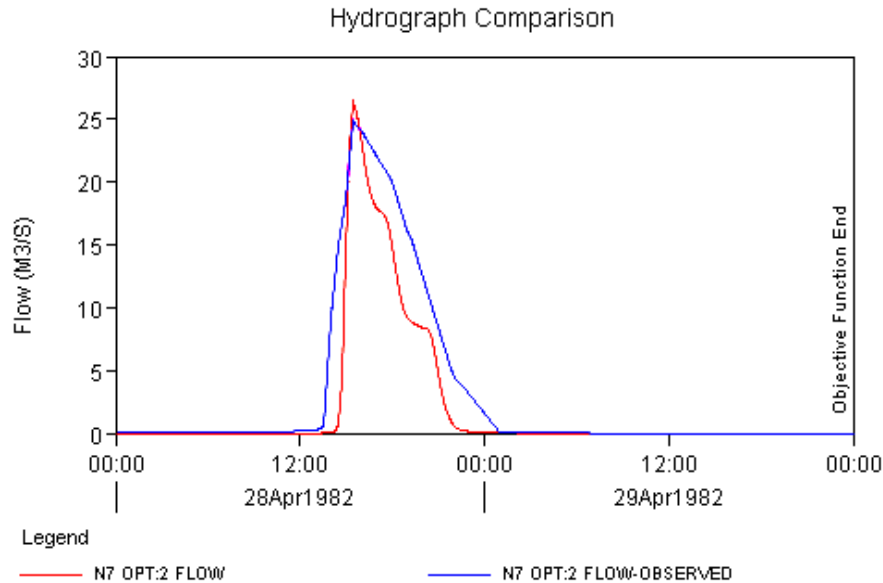


Figura 7-35. Comparación entre el hidrograma simulado y el observado

CARACTERÍSTICA	SIMULADO	OBSERVADO	DIFERENCIA	DIFERENCIA (%)
Volumen (x1000 m ³)	336.09	510.91	-174.82	-34.22
Caudal pico (m ³ /s)	26.37	24.91	1.46	5.9
Tiempo del pico	28abr1982, 15:30	28abr1982, 15:30		
Tiempo del centro de masa	28abr1982, 17:21	28abr1982, 17:34		

Tabla 7-39. Resultados generales de la calibración

Con respecto al tiempo de ocurrencia del caudal pico, el modelo reproduce con buena precisión la hora de ocurrencia de dicho caudal; así mismo, la hora de ocurrencia del centro de masa es muy parecida entre la simulada y la observada.

La diferencia entre los valores de volumen tanto simulado como observado, puede leerse a los volúmenes de precipitación que se están manejando en este evento.

La Figura 7-36 muestra la forma como converge la función objetivo en función del número de iteraciones de cálculo.

Peak-Weighted RMS Error Objective Function

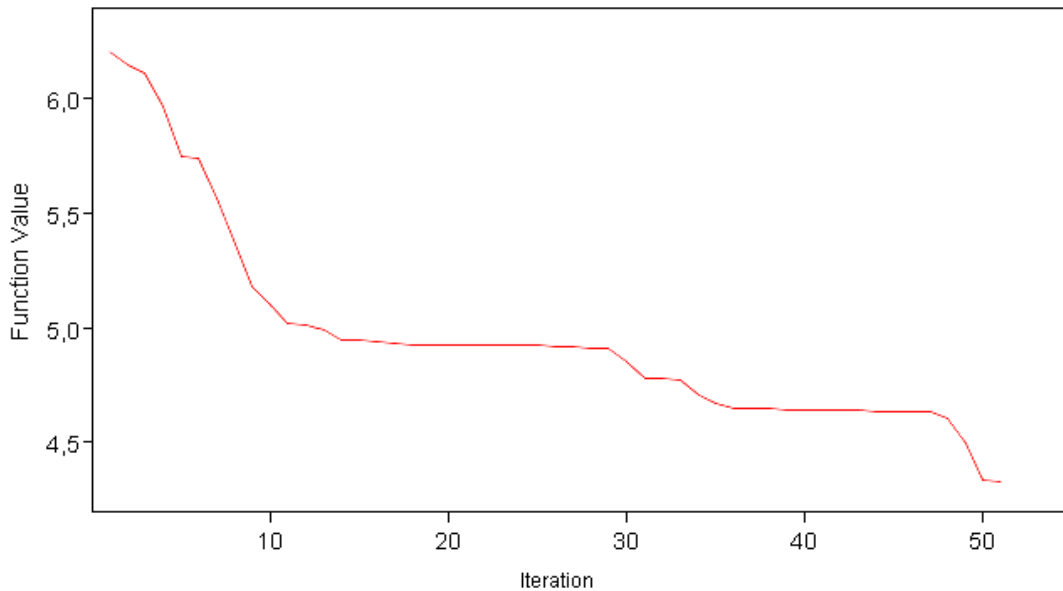


Figura 7-36. Convergencia de la función objetivo

La Tabla 7-40 muestra la comparación entre los parámetros iniciales de cada subcuenca y el estimado a partir de la calibración, con su respectiva sensibilidad de parámetro, que corresponde al porcentaje de cambio de la función objetivo resultante del cambio en el 1% del valor del parámetro óptimo. En esta tabla se puede apreciar, que no hay una variación muy grande en las abstracciones iniciales de cada subcuenca, al igual que en el tiempo de retardo, contrario al número de curva, que en muchos de los casos presentó variaciones significativas.

ELEMENTO	PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR ÓPTIMO	FUNCIÓN OBJETIVO
La Colorada	Número de curva		82	87.10	-0.19
La Fotoga	Número de curva		71	85.28	-0.09
La Mina	Número de curva		77	88.22	-0.44
La Osa	Número de curva		76	87.73	-0.69
La Osa Baja	Número de curva		72	85.77	-0.03
La Upata	Número de curva		71	79.40	-0.3
Laureles	Número de curva		68	77.30	-0.33
Palo Blanco Alta	Número de curva		80	85.70	-0.65
Palo Blanco Alto Derecho	Número de curva		72	80.10	-0.2
Palo Blanco Medio	Número de curva		77	83.60	-0.24
PB-1	Número de curva		83	87.80	-0.04

ELEMENTO	PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR ÓPTIMO	FUNCIÓN OBJETIVO
PB-3	Número de curva		77	83.60	-0.1
Piedra Redonda	Número de curva		65	74.75	-0.09
La Colorada	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
La Fotoga	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
La Mina	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
La Osa	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
La Osa Baja	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
La Upata	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
Laureles	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
Palo Blanco Alta	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
Palo Blanco Alto Derecho	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
Palo Blanco Medio	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
PB-1	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
PB-3	Abstracción inicial	MM	2	1.33	0
Piedra Redonda	Abstracción inicial	MM	2	1.96	0
La Colorada	Tiempo de retardo	MIN	13	8.67	0
La Fotoga	Tiempo de retardo	MIN	29	29.21	0
La Mina	Tiempo de retardo	MIN	24	36.00	0
La Osa	Tiempo de retardo	MIN	24	36.00	0
La Osa Baja	Tiempo de retardo	MIN	10	6.70	0
La Upata	Tiempo de retardo	MIN	36	36.35	0
Laureles	Tiempo de retardo	MIN	33	49.50	0
Palo Blanco Alta	Tiempo de retardo	MIN	22	33.16	0
Palo Blanco Alto Derecho	Tiempo de retardo	MIN	31	46.69	0
Palo Blanco Medio	Tiempo de retardo	MIN	20	20.67	0
PB-1	Tiempo de retardo	MIN	6	6.00	0
PB-3	Tiempo de retardo	MIN	11	7.37	0
Piedra Redonda	Tiempo de retardo	MIN	34	34.33	0
R370	n de Manning		0.025	0.0245	0
R390	n de Manning		0.025	0.0251	0
R420	n de Manning		0.025	0.0251	0
R490	n de Manning		0.025	0.0167	0
R510	n de Manning		0.025	0.0251	0
R530	n de Manning		0.025	0.0375	0

Tabla 7-40. Comparación entre parámetros iniciales y parámetros calibrados

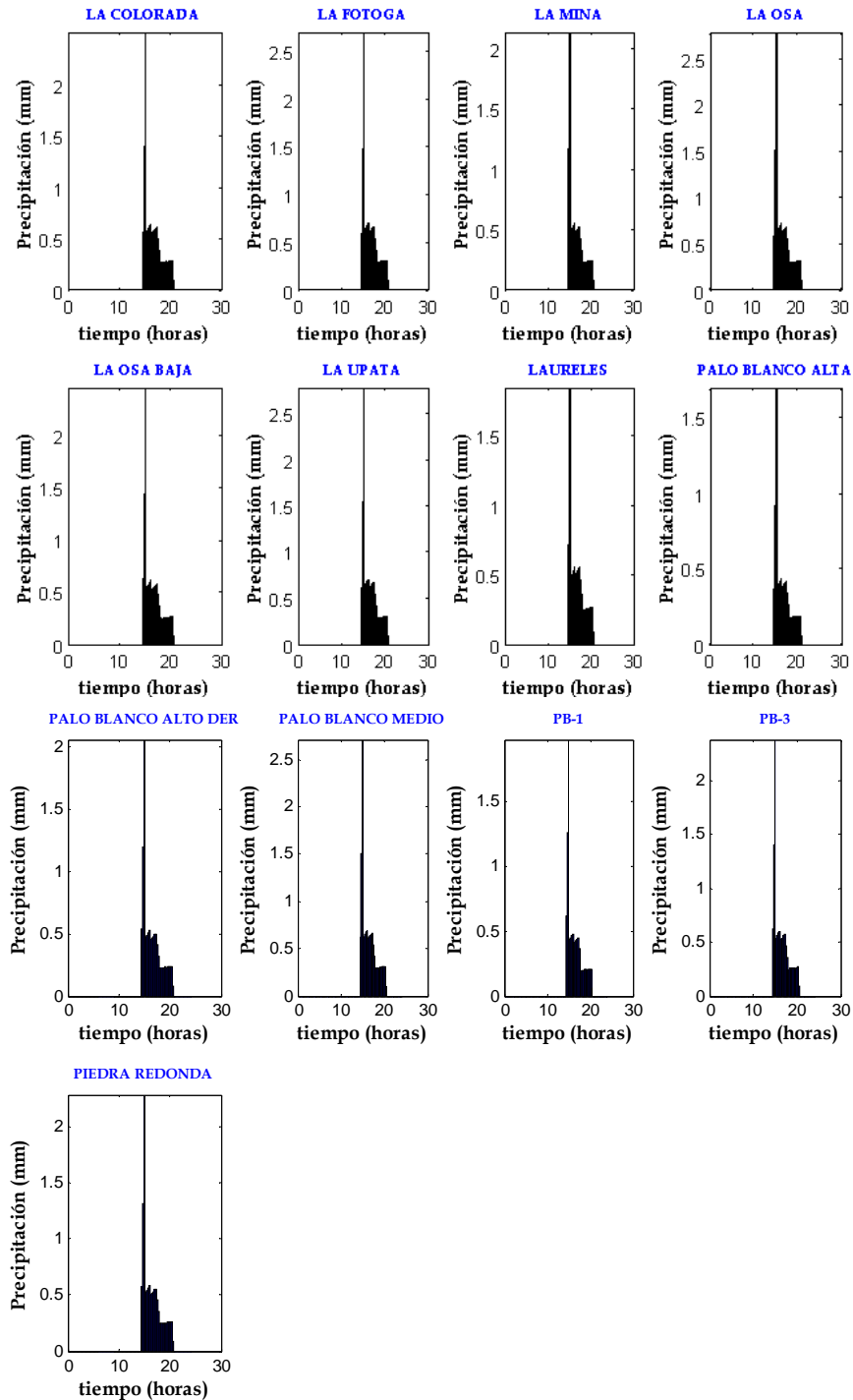


Figura 7-37. Hietogramas de precipitación efectiva para el evento de calibración

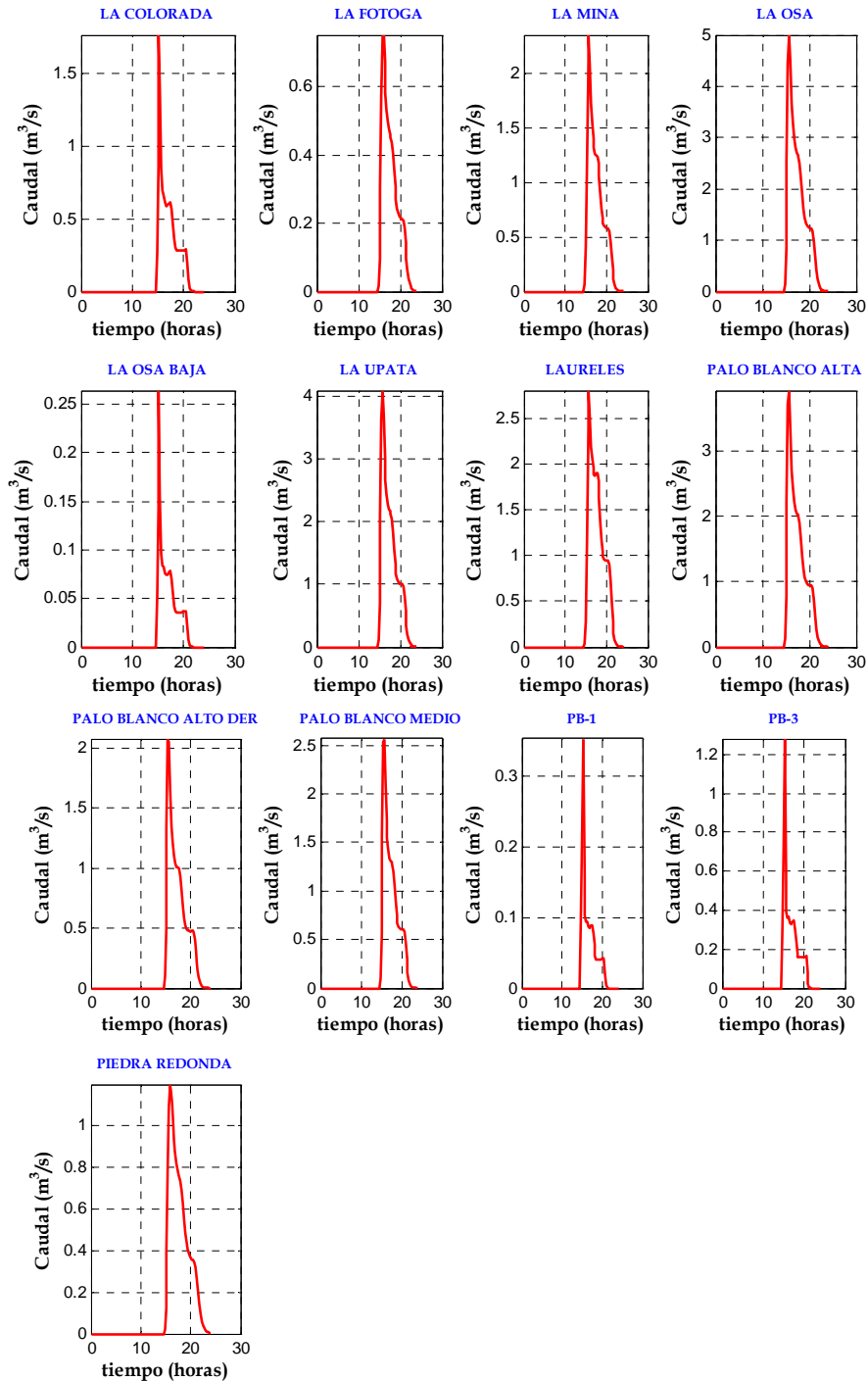


Figura 7-38. Hidrogramas obtenidos en las subcuencas para el evento de calibración

Las figuras 7-37 y 7-38 muestran los histogramas de precipitación efectiva y el hidrograma de escorrentía directa en las diferentes subcuencas que se analizaron

en la calibración del modelo lluvia – escorrentía. Aquí se puede apreciar que el aporte de caudal de cada una de las subcuencas para este evento, oscila entre 1 y 5 m³/s. siendo el aporte mas alto, el de la quebrada La Osa, con aproximadamente 5 m³/s.

7.5.5 Resultados para diferentes períodos de retorno de evento de lluvia

A continuación se presentan los hidrogramas de caudal, obtenidos a partir del modelo calibrado lluvia – escorrentía, empleando la tormenta de 6 horas de duración de la Figura 7-31, para los diferentes períodos de retorno.

Es importante resaltar, que puesto que los números de curva calibrados corresponden a una condición antecedente I (AMC I), se optó por simular los hidrogramas con una condición un poco más extrema de lluvia antecedente, es decir, para una condición antecedente II (AMC II), amplificando el número de curva, de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el marco teórico de este estudio. En la siguiente tabla, se presentan dichos valores del número de curva.

NOMBRE	Número de curva inicial AMC I	Número de curva calibrado AMC I	Número de curva calibrado AMC II	Número de curva calibrado AMC III
El Soche	65.00	65.00	81.03	90.85
El Triangulo	76.00	76.00	87.93	94.43
La Colorada	82.00	87.10	93.95	97.31
La Fotoga	71.00	85.28	93.02	96.87
La Mina	77.00	88.22	94.51	97.56
La Osa	76.00	87.73	94.27	97.45
La Osa Baja	72.00	85.77	93.27	96.99
La Pichosa	73.00	73.00	86.15	93.53
La Upata	71.00	79.40	89.86	95.37
Laureles	68.00	77.30	88.68	94.80
Palo Blanco Alta	80.00	85.70	93.24	96.97
Palo Blanco Alto Der	72.00	80.10	90.25	95.56
Palo Blanco Medio	77.00	83.60	92.14	96.46
PB-1	83.00	87.80	94.30	97.47
PB-3	77.00	83.60	92.14	96.46
PB-4	72.00	72.00	85.54	93.22
PB-4-2	74.00	74.00	86.75	93.84
Piedra Redonda	65.00	74.75	87.19	94.06
Ramajal	67.00	67.00	82.36	91.57
San Cristobal	76.00	76.00	87.93	94.43
Vitelma	81.00	81.00	90.75	95.80

Tabla 7-41. Números de curva para diferentes condiciones de lluvia antecedente

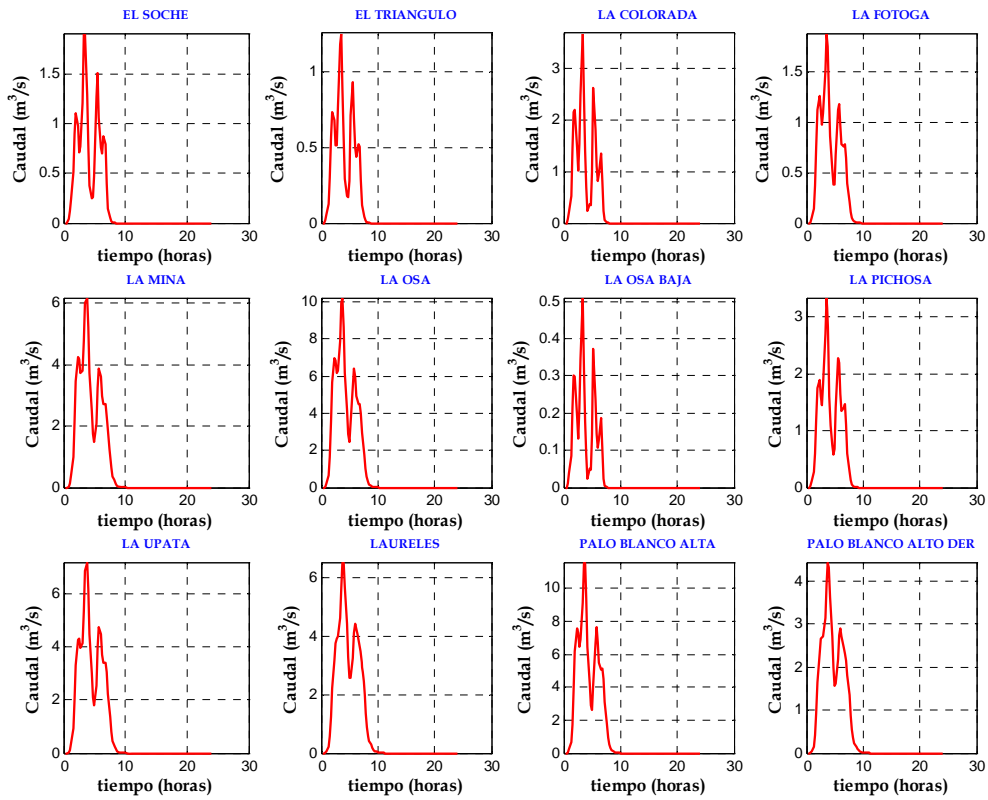


Figura 7-39. Hidrogramas de caudal para $Tr=3$ años (Parte 1)

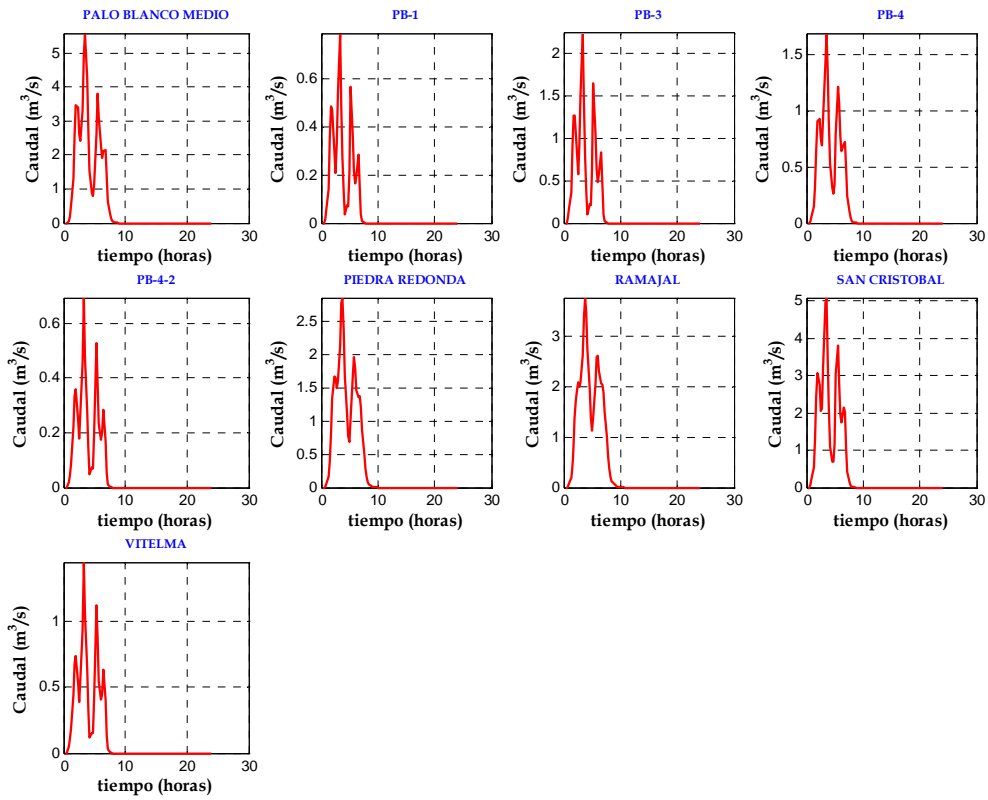


Figura 7-40. Hidrogramas de caudal para $Tr=3$ años (Parte 2)

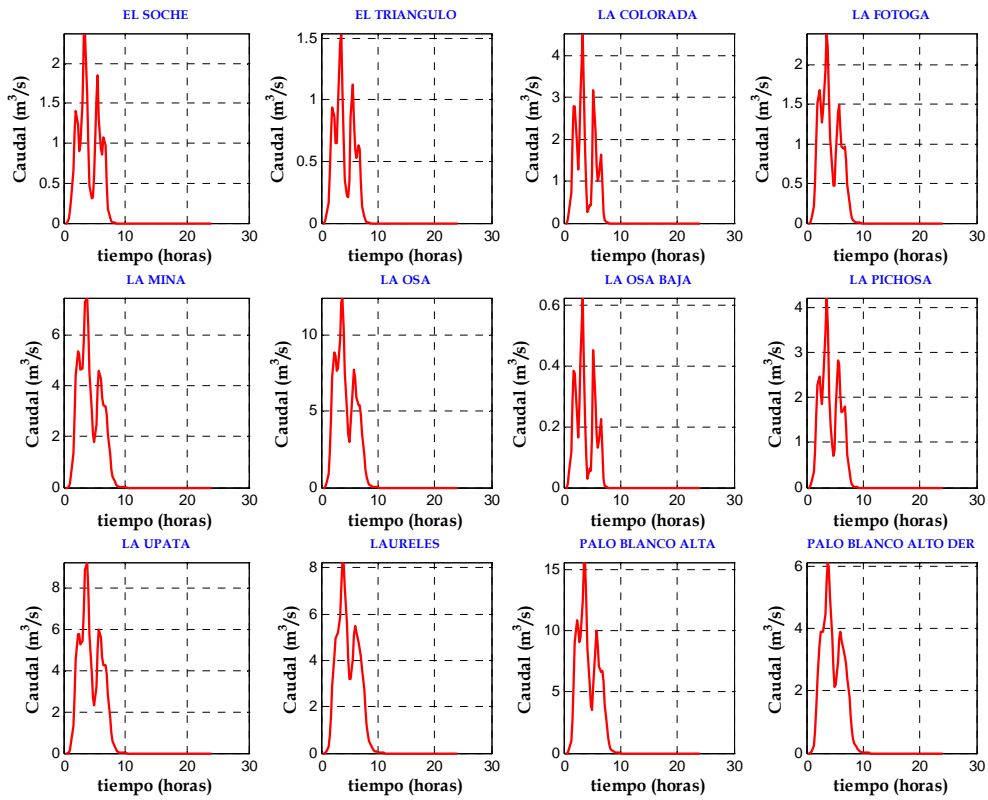


Figura 7-41. Hidrogramas de caudal para $Tr=5$ años (Parte 1)

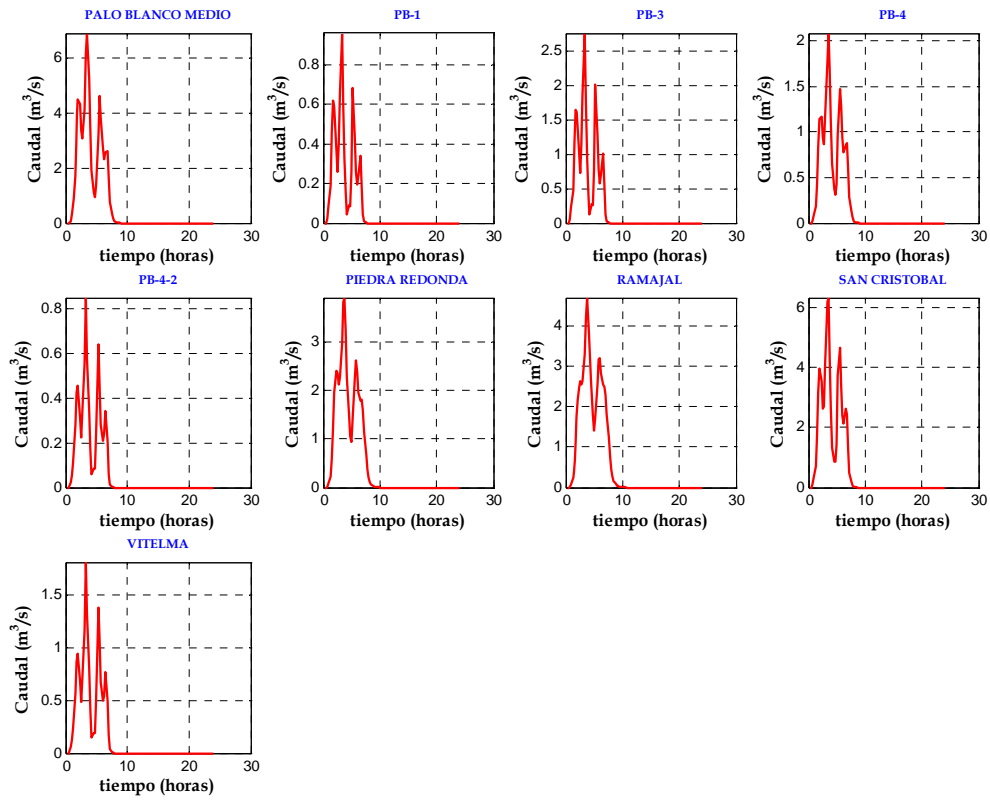


Figura 7-42. Hidrogramas de caudal para $Tr=5$ años (Parte 2)

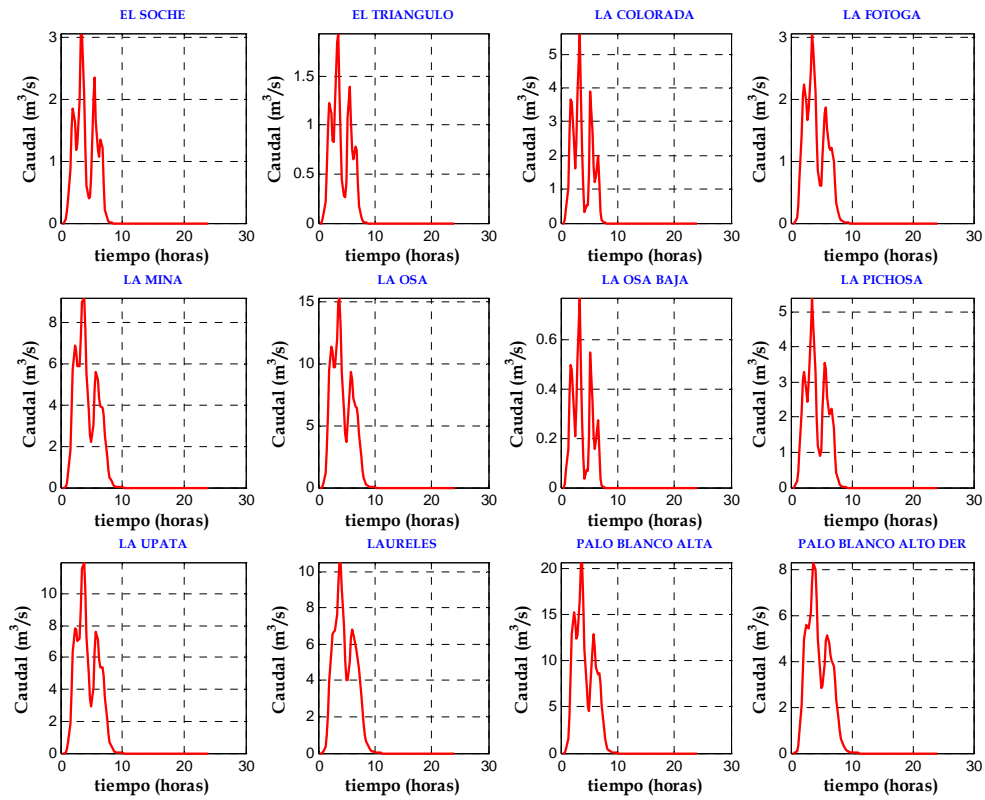


Figura 7-43. Hidrogramas de caudal para $Tr=10$ años (Parte 1)

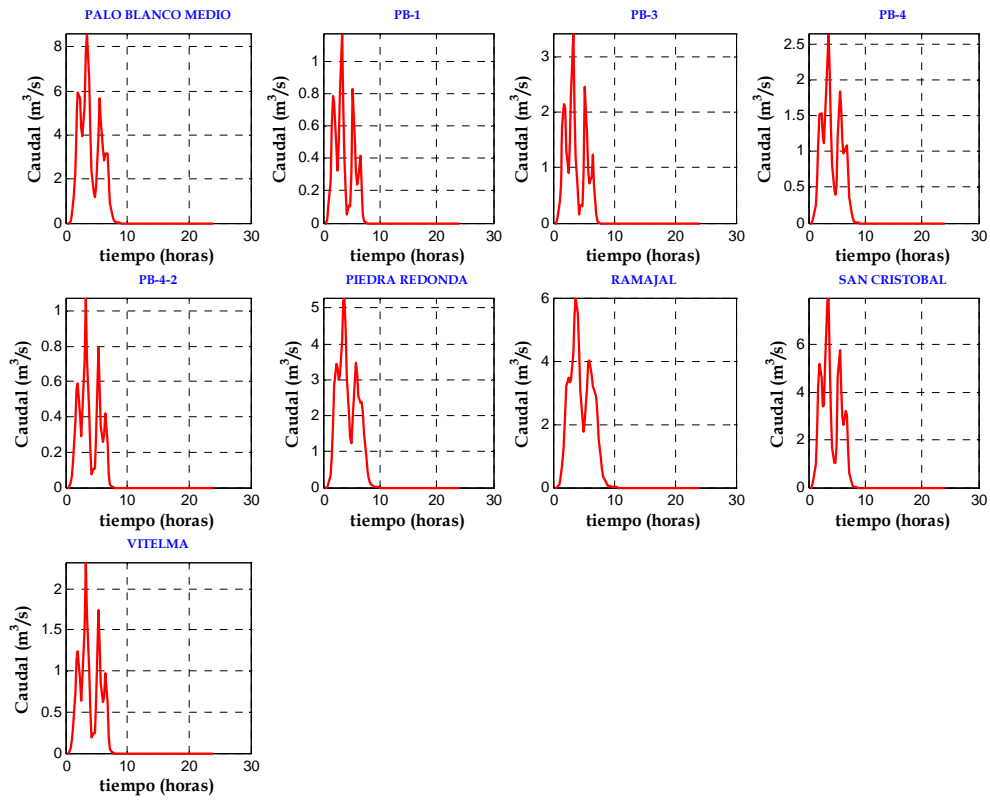


Figura 7-44. Hidrogramas de caudal para $Tr=10$ años (Parte 2)

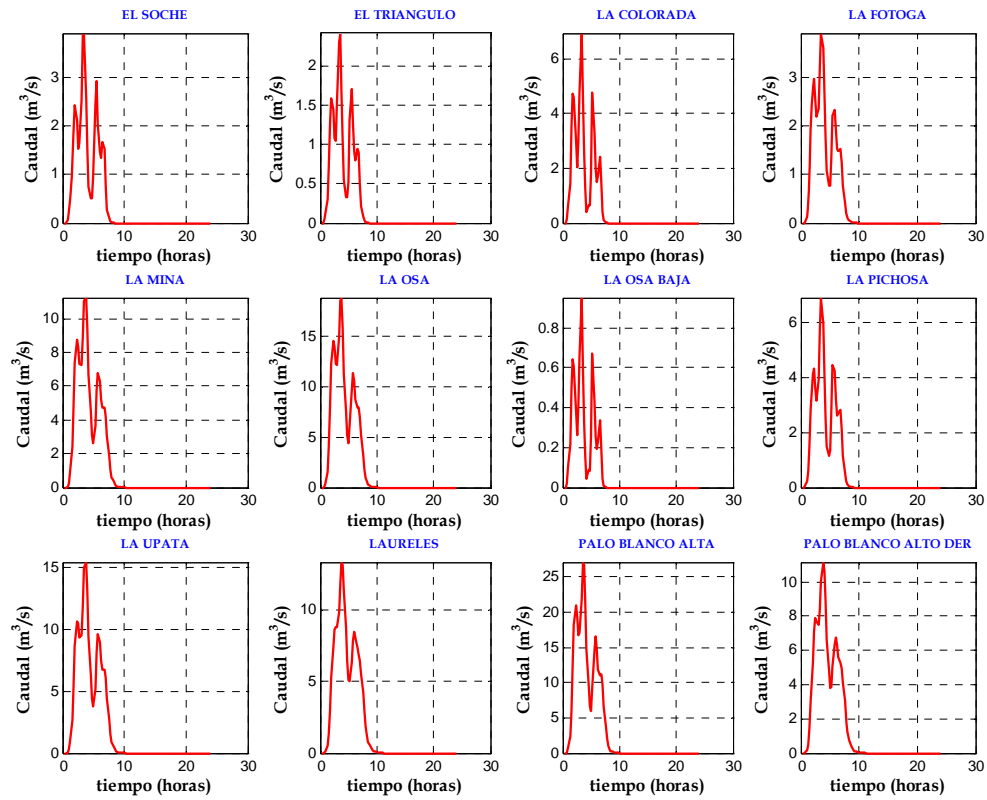


Figura 7-45. Hidrogramas de caudal para $Tr=25$ años (Parte 1)

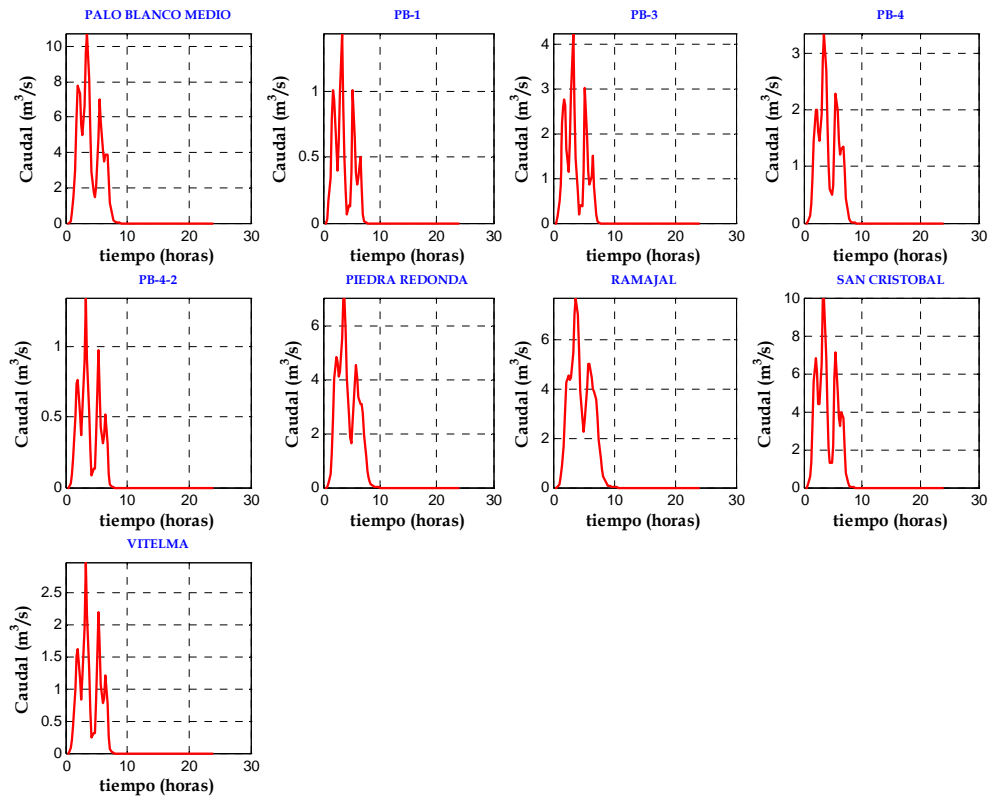


Figura 7-46. Hidrogramas de caudal para $Tr=25$ años (Parte 2)

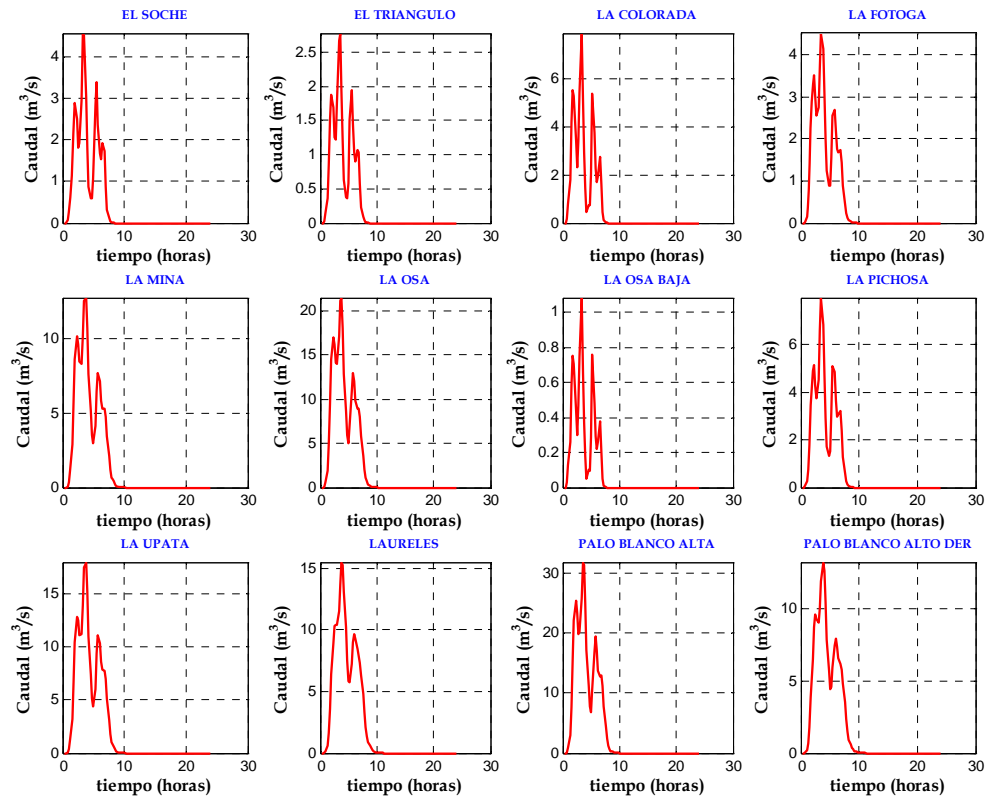


Figura 7-47. Hidrogramas de caudal para $Tr=50$ años (Parte 1)

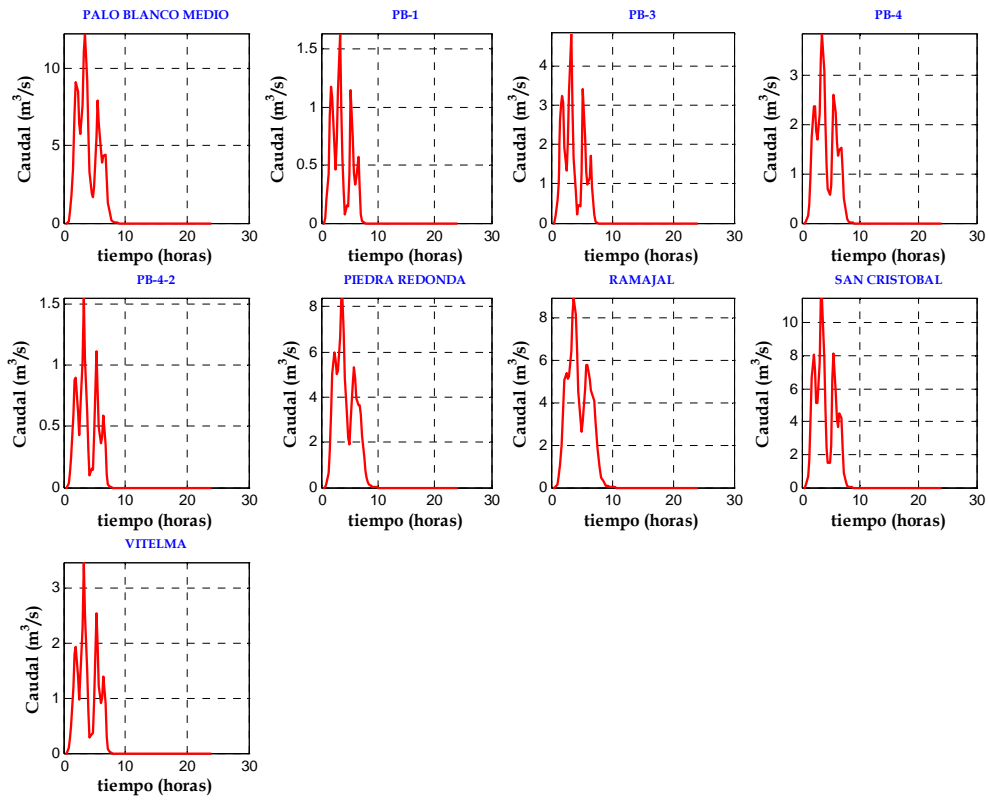


Figura 7-48. Hidrogramas de caudal para $Tr=50$ años (Parte 2)

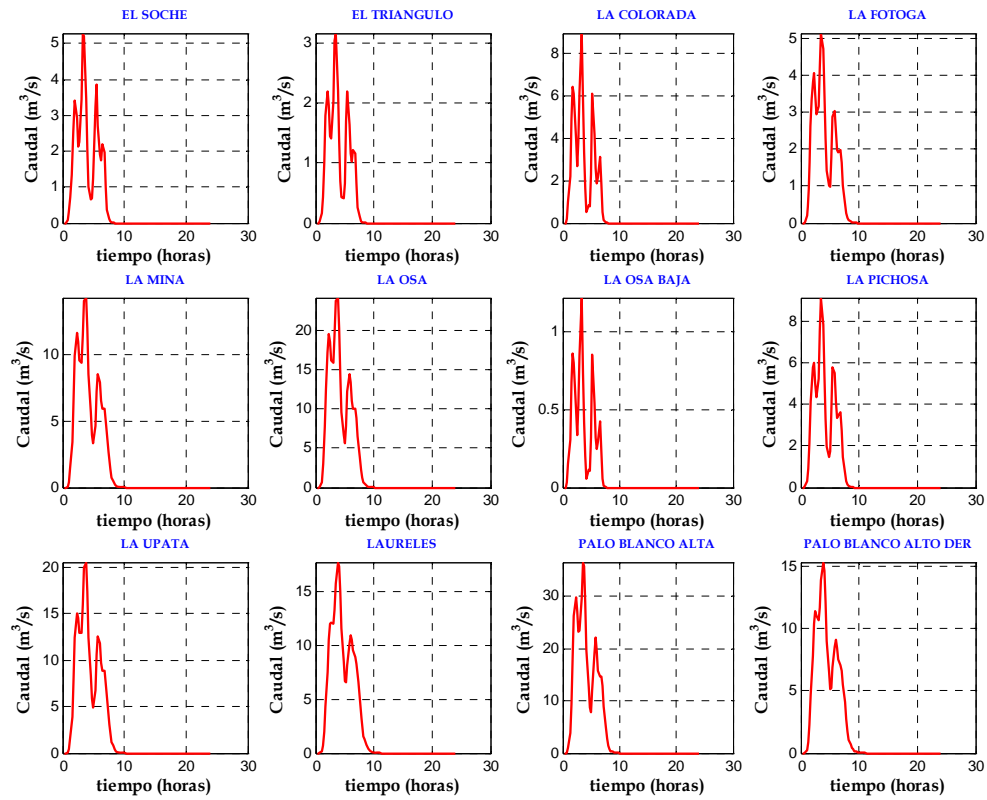


Figura 7-49. Hidrogramas de caudal para $Tr=100$ años (Parte 1)

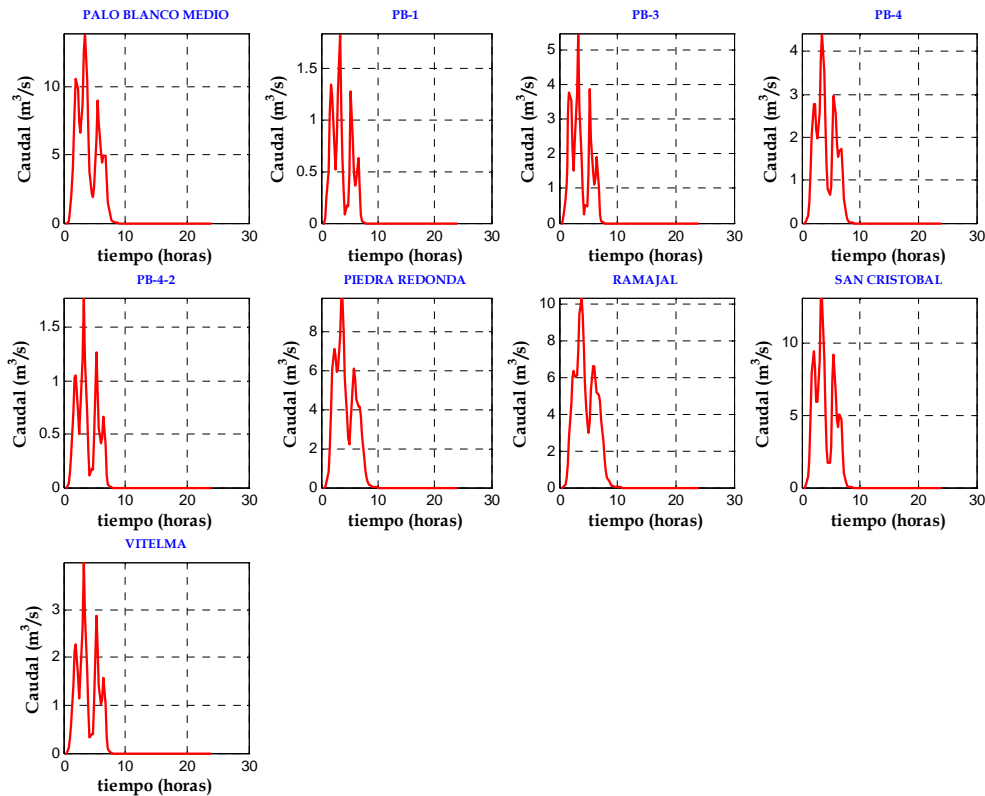


Figura 7-50. Hidrogramas de caudal para $Tr=100$ años (Parte 2)

7.5.6 Aforos de caudal con trazadores iónicos

En el presente estudio, se realizaron aforos de caudal líquido para diferentes épocas en el año, con un total de cinco mediciones durante los meses iniciales del año. Estos aforos tenían como finalidad, la caracterización de los caudales en el cauce del río San Cristóbal y sus afluentes, así como también la posibilidad de obtener un caudal base para complementar la información obtenida en los análisis presentados anteriormente.

Los resultados en detalle de los aforos de caudal con trazadores iónicos, así como la técnica utilizada y la metodología de la misma, se presentan en el Anexo D-6 de este informe. A continuación se presentan solo los resultados obtenidos, y un breve análisis de los mismos.

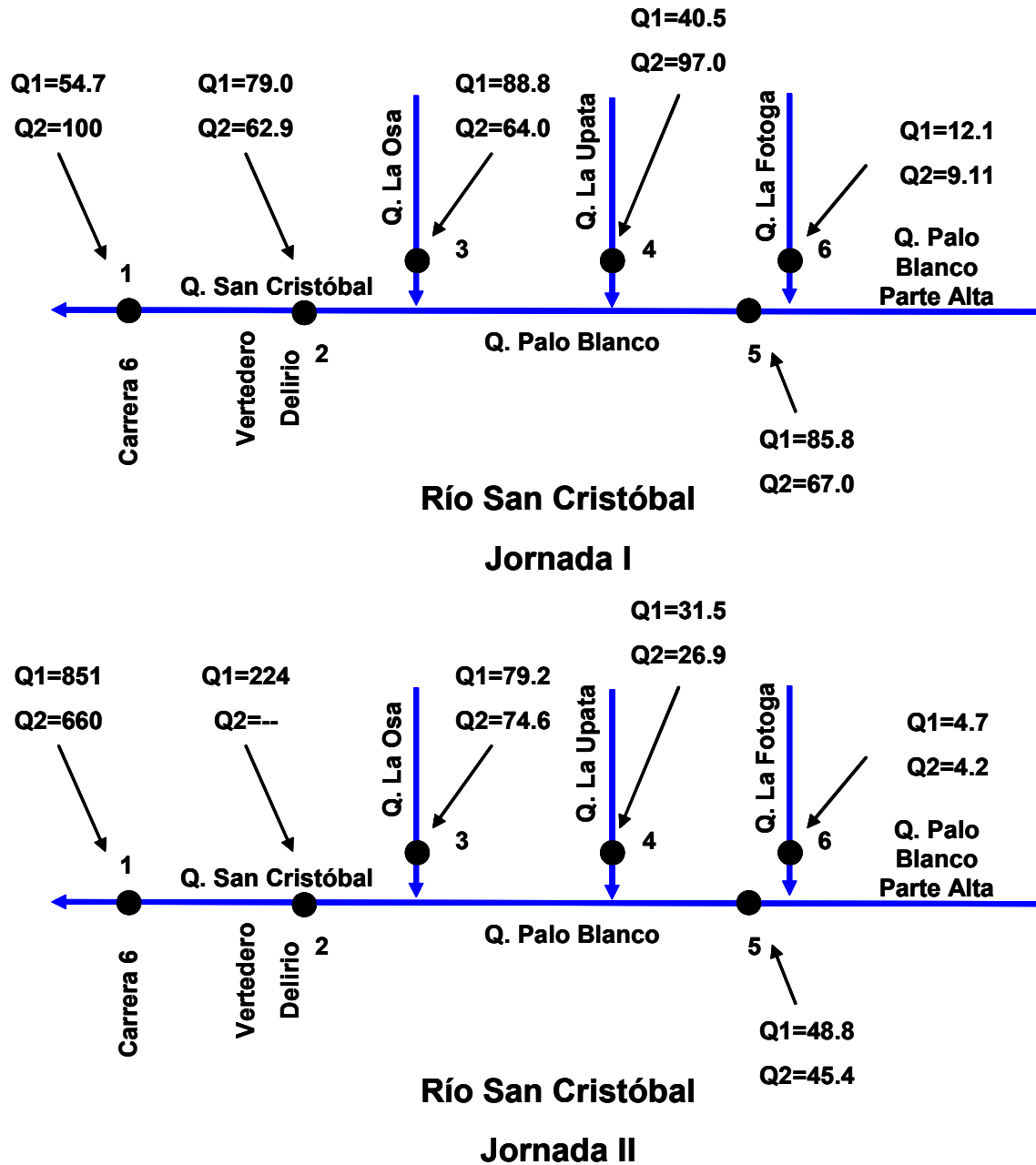


Figura 7-51. Resultados de los aforos de caudal liquido [litros/seg] (Parte 1)

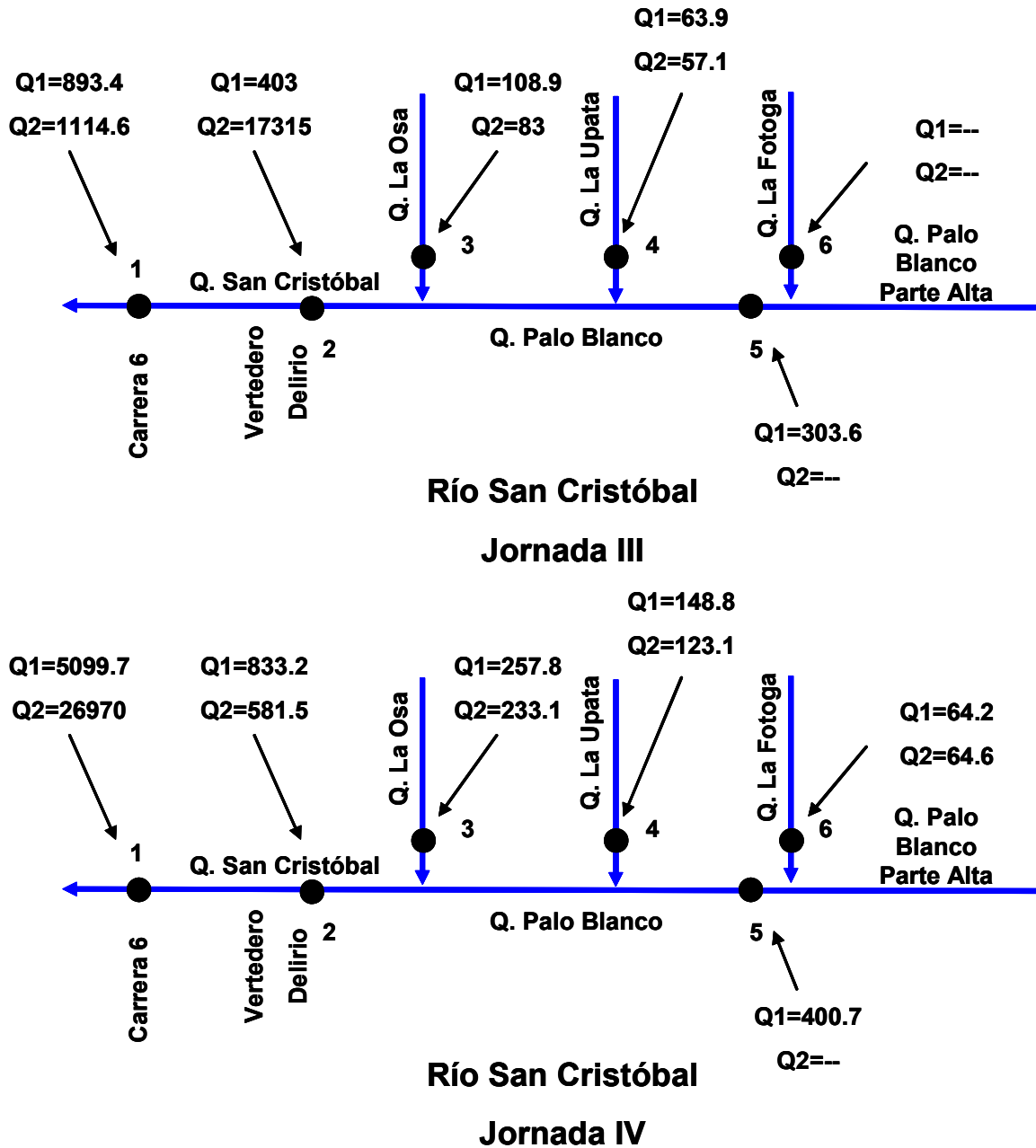


Figura 7-52. Resultados de los aforos de caudal liquido [litros/seg] (Parte 2)

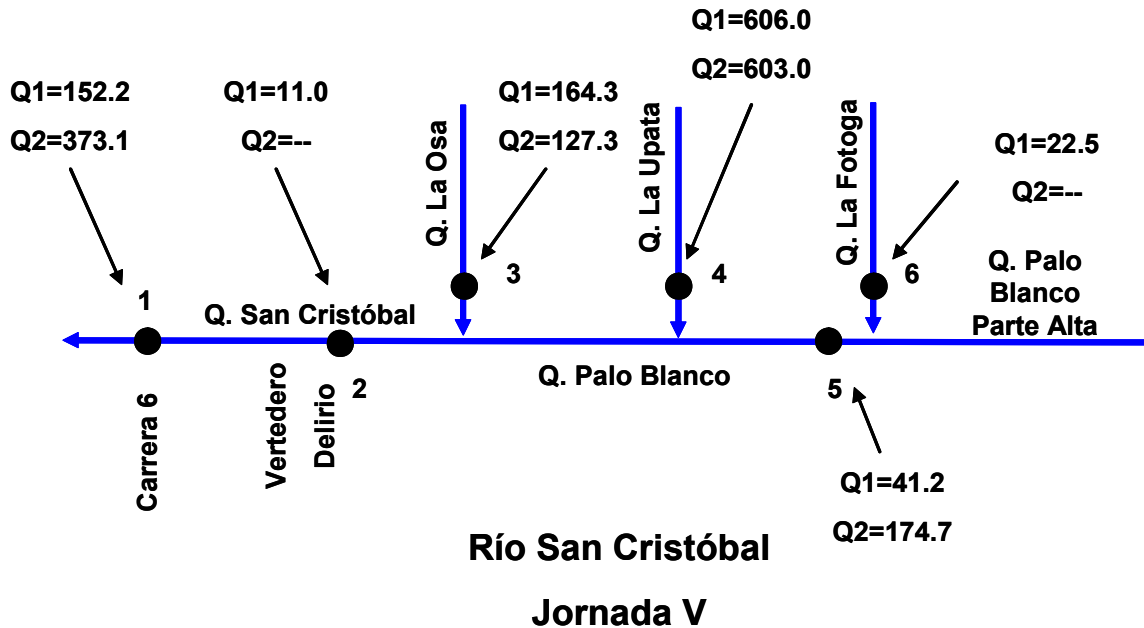


Figura 7-53. Resultados de los aforos de caudal líquido [litros/seg] (Parte 3)

En la Figura 7-53, a manera de esquema, se puede apreciar los puntos donde se tomaron aforos de caudal. Todos estos puntos se realizaron a pocos metros de las confluencias de las quebradas al cauce principal, ya sea sobre la quebrada o sobre el río.

Notese que para las diferentes campañas, en muchos de los casos no fue posible obtener un balance de masa que pudiese validar los resultados obtenidos en los diferentes aforos, adicionalmente, en un punto de muestreo donde se realiza medición simultánea con dos equipos, no se obtuvieron datos cercanos como era de esperarse, que permitieran de una u otra forma inducir a un valor único de caudal en la corriente.

Por otro lado, es evidente que los valores de los caudales medidos, no corresponden a eventos de creciente y por lo tanto sus valores son muy inferiores con los estimados en las diferentes corrientes, en los análisis hidrológicos para los diferentes periodos de retorno.

Estas incongruencias planteadas, ponen en duda la veracidad de los resultados de los aforos, y generan hacia futuro la necesidad de estudiar más este método empleado.

7.6 Hidraulica

En este apartado, se presentan los análisis hidráulicos de los cauces más importantes en la zona de estudio, que abarcan el río San Cristóbal en el tramo desde el sitio La María hasta la carrera décima en la zona urbana de la cuenca, y las quebradas Ramajal, La Pichosa y el Triangulo. Para estos cauces localizados en el área de estudio, se contempló establecer zonas de amenaza por flujos no solo de agua, sino también de agua más sedimentos, para diferentes periodos de retorno de eventos de lluvia (3, 5, 10, 25, 50 y 100 años), y cuyos hidrogramas de caudal líquido se obtuvieron de los análisis hidrológicos de este estudio.

Se presenta también, los análisis realizados a las diferentes estructuras localizadas sobre el cauce del río San Cristóbal, a fin de establecer el comportamiento hidráulico y la capacidad de tales estructuras. Esto se logró, empleando el software HEC-RAS Y HEC-GEORAS, desarrollado por el grupo científico del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). La razón por la cuál se emplea este software, es debido a la gran facilidad que presenta el mismo para el análisis de estructuras como puentes, alcantarillas, pilas de puente, etc.

De igual forma, las zonas de amenaza por diferentes tipos de flujo en los cauces mencionados, se realiza empleando el software FLO-2D, propuesto para esta investigación con el fin de simular flujos de agua con y sin sedimentos.

Es importante anotar, que en el desarrollo del estudio, se realizó una revisión de todos los antecedentes de eventos en la cuenca a partir de la información suministrada por la DPAE, en la cual pese a que si se encontraron antecedentes, no se tuvieron datos claros que permitieran en cierta forma cartografiar eventos y más aún, establecer zonas potenciales a ser inundadas. En reconocimiento de campo realizado por el grupo de la Universidad, tampoco se evidenciaron marcas dejadas por el flujo que dieran indicios de eventos extremos, y los relatos de los pobladores de las zonas ribereñas, tampoco dan claridad a la presencia de este tipo de eventos.

Con respecto a la capacidad de transporte de material del lecho, en este estudio no se consideró dicho fenómeno, dado que por una parte para los eventos a simular, en principio se pensó que los aportes producidos por la inestabilidad de las laderas o los deslizamientos cercanos al cauce, en un evento instantáneo, serían un aporte de material sólido mucho mayor que el que se pudiese presentar por el arrastre del material del lecho; Además, dadas las características de dicho material en el lecho (material granular, con cantos rodados y bloques de tamaños grandes), ante este tipo de eventos (flujos con altas concentraciones de sedimentos finos, hiperconcentrados, etc.), no presentarían un arrastre significativo debido a que el flujo en ese momento está saturado por los aportes de

deslizamientos y no tiene la suficiente capacidad hidráulica para transportar dichos materiales y por otra parte la dinámica observada en la cuenca está estrechamente relacionada con la geología de la zona que se encuentra dividida en tres grandes sectores, la parte alta de la cuenca conformada por un depósito coluvial matriz soportado (sector por el cual al paso del río se ha quitado la matriz y dejado al descubierto los grandes bloques que se encuentran en el cauce); un segundo sector donde aflora la roca (sector del batallón donde se presentan las velocidades más altas en la modelación) y el tercer sector donde se encuentra el abanico (sector de bajas velocidades)

Por otra parte, el proceso de socavación general en un cauce no es predominante en presencia de eventos de flujos con altas concentraciones de material fino, contrario al proceso de depositación, que si puede ocurrir, si se presentase un cambio sustancial en la pendiente que ocasiona una disminución en la velocidad del flujo. El proceso de socavación puede presentarse antes o después del paso del flujo con altas concentraciones de finos, en presencia de caudales grandes o pequeños, en una ventana de tiempo que por lo general es mucho mayor a la ocurrencia de este tipo de eventos.

Y finalmente, si existe un cambio en el lecho producido por la socavación, esto induce a un cambio en las características de las secciones transversales del cauce, situación que no es posible simular con los modelos empleados, dado que estos mantienen fijas las condiciones topográfica y batimétricas.

Es de anotar, que hay sitios en los cuales se presentan altas velocidades en el cauce de acuerdo con los resultados de las simulaciones realizadas con los modelos matemáticos; en estos sitios, el lecho del cauce está prácticamente sobre la roca, por lo cual tampoco existiría material sólido en ese caso, que pueda ser transportado por la corriente.

7.6.1 Limitaciones de los modelos empleados en los análisis

El HEC-RAS es un software capaz de simular el comportamiento del flujo en un canal ya sea natural o artificial, unidimensionalmente y en flujo permanente gradualmente variado, y en flujo no permanente para un régimen subcrítico, supercrítico o mixto (se entiende por mixto, la combinación de flujo supercrítico y subcrítico).

Dicho software, de libre uso, resulta muy práctico dada la facilidad para la introducción de los datos, debido a su entorno amigable bajo el sistema operativo Windows y la integración a sistemas de información geográfica.

Entre las limitaciones de este software, la principal, relacionada con los diferentes tipos de flujo que se pueden presentar en un cauce torrencial, y para tipos de flujo con altas concentraciones de sólidos (flujos hiperconcentrados, de lodos y/o de detritos), es que la densidad del fluido es constante y corresponde solamente a flujo de agua. De igual forma, dado que el flujo es unidimensional en este software, no es posible conocer como es el movimiento hacia las laderas o zonas de inundación del cauce, ya que se supone que el nivel del agua en una sección transversal es horizontal a lo ancho de la misma.

Este modelo no cambia la geometría del cauce, lo que lo hace poco práctico si se quiere analizar procesos como la depositación de sólidos o la socavación en el cauce natural.

Al diferencia del HEC-RAS, el FLO-2D es un modelo bidimensional capaz de simular el comportamiento del flujo en sobre un plano horizontal, teniendo en cuenta las características topográficas de la zona de estudio, y las características del flujo, pudiendo este considerar los cambios en las concentraciones de sólidos en proporción del volumen total, así mismo como los cambio en la densidad y en la viscosidad del flujo.

Como limitantes, este software, también presenta un fondo fijo, de manera que no puede considerar los efectos de la socavación tanto en el cauce, como en las planicies de inundación. La precisión en los resultados, radica en la calidad de la información, especialmente en la topografía, dado que el software genera la malla de cálculo interpolando para celdas cuadradas los niveles de elevación del terreno.

7.6.2 Hidrogramas de caudal líquido

Para el presente estudio, se analizaron las características hidrológicas de la cuenca alta del río San Cristóbal, a fin de estimar los hidrogramas de caudal líquido para diferentes periodos de retorno de eventos de lluvia.

7.6.3 Granulometrías del lecho

Para establecer otras características importantes del flujo no sólo de agua sino también de agua y sedimentos, se realizaron ensayos granulométricos e hidrométricos que permitieron establecer posibles parámetros de viscosidad y esfuerzo cortante dado el caso se presentase un flujo viscoso con una alta concentración de sedimentos.

Estas granulometrías e hidrometrías, se realizaron para siete muestras tomadas a lo largo del cauce del río San Cristóbal y en algunos de sus afluentes principales (Figura 7-55). Las muestras fueron tomadas en el lecho de los cauces; no se toman muestras en las bancas, en primer lugar, porque en algunos sitios es difícil hacer la diferencia entre el lecho y bancas por la forma de la sección transversal, y en segundo lugar, por que la utilidad de esta información no es práctica para este estudio.

Una técnica novedosa para realizar muestreo sedimentológico, consiste en la toma de fotografías en un plano horizontal, para su posterior análisis y conteo de los materiales del lecho en oficina. Esta técnica, resulta práctica en la medida que se quiera caracterizar los materiales de tamaños apreciables en las fotografías, pero no muy práctica cuando en realidad se quiere conocer el porcentaje de finos y su distribución granulométrica, que es la información que finalmente se requiere para este tipo de estudios. Dado que el objetivo es generar una guía metodológica, no se hace necesario realizar, por las razones expuestas, un análisis de este tipo.

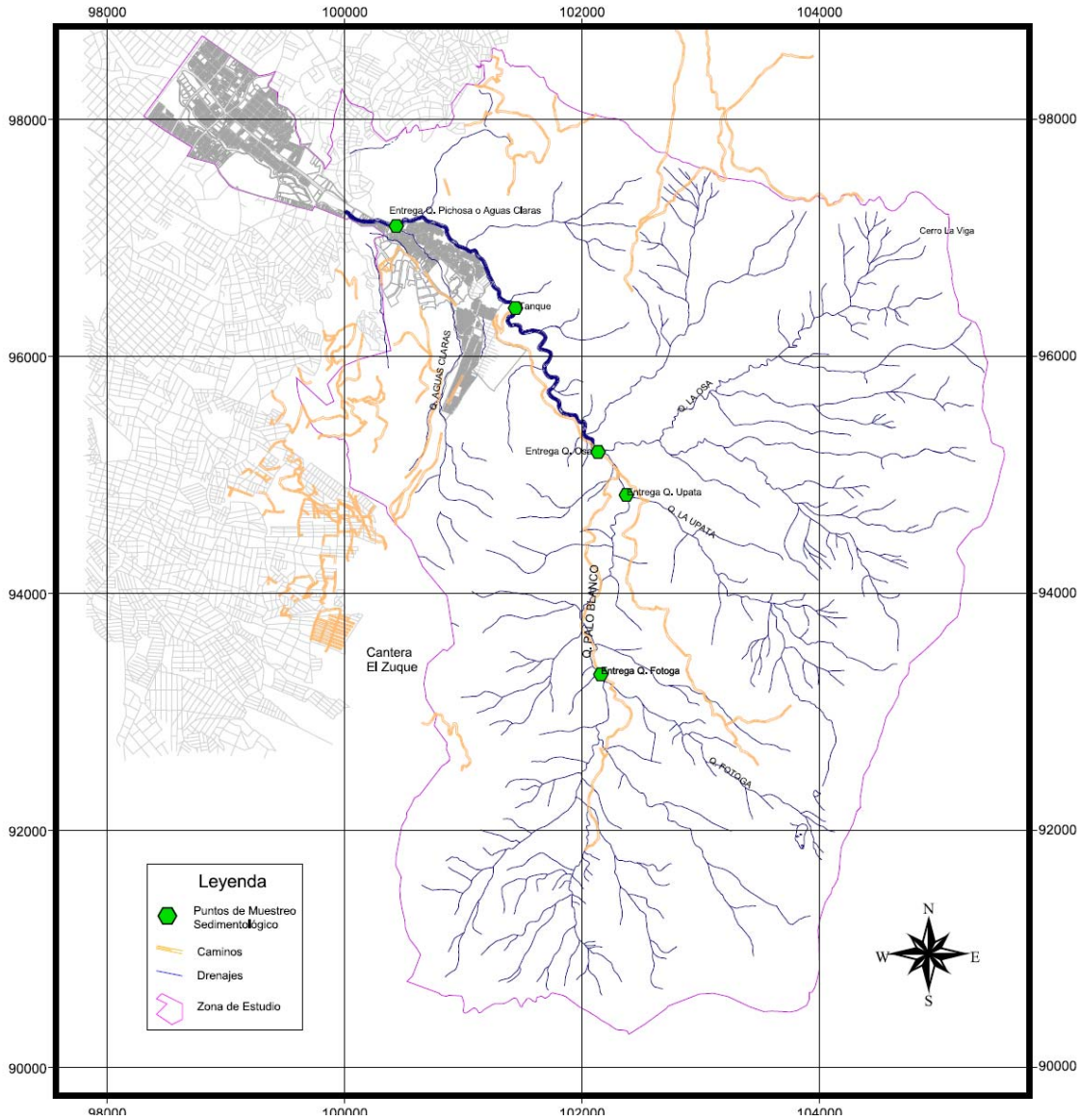


Figura 7-54. Ubicación de los puntos de muestreo para análisis sedimentológicos

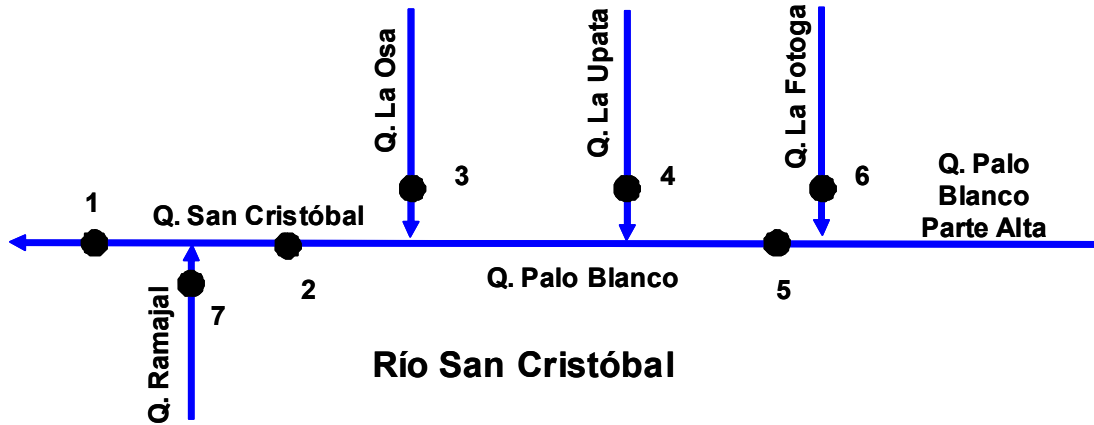


Figura 7-55. Puntos de toma de muestras para análisis sedimentológicos

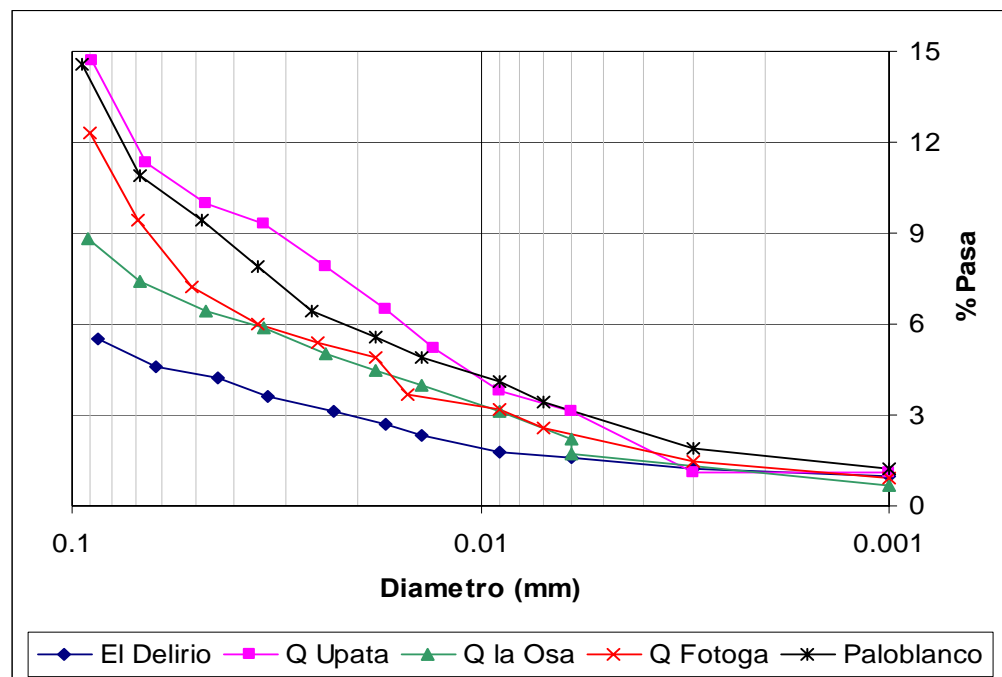


Figura 7-56. Hidrometrías del lecho en el río san Cristóbal y en algunos de sus afluentes

De la Figura 7-56 se puede apreciar que el porcentaje de finos que pasa el tamiz No. 200 en la parte media, que corresponde a las muestras tomadas en el vertedero El Delirio, y las quebradas La Upata y La Osa, está entre el 3% y el 10%, siendo el valor más alto el tomado en la quebrada La Upata. Hacia la parte alta, la variación del porcentaje de finos oscila entre 8 y 10%.

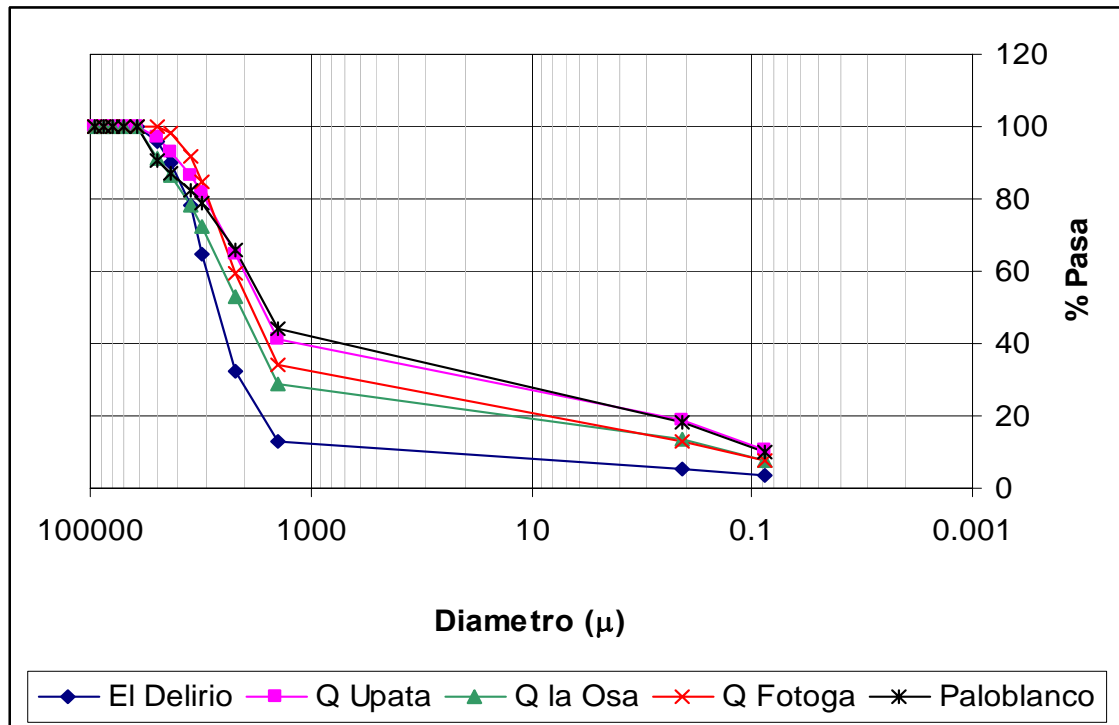


Figura 7-57. Granulometrías del lecho en el río san Cristóbal y en algunos de sus afluentes

A dichas muestras, también se les realizaron pruebas a fin de establecer la densidad relativa de las partículas del lecho. Estos valores de densidad relativa en promedio presentaron un valor de 2.64, cercano al valor reportado para este parámetro en la literatura.

En la Tabla 7-42 se muestran los valores obtenidos para el diámetro medio de las partículas en los diferentes cauces donde se realizó el muestreo. Aquí se puede apreciar, que éste es mayor en la parte media, que corresponde al sitio Vertedero El Delirio, en tanto que para los afluentes al río san Cristóbal, dicho valor está entre 3 y 4.5 mm.

Abertura (mm)	Nombre	El Delirio	Upata	Q. La Osa	Q. Fotoga	Paloblanco
		% Pasa				
0.000075	No. 200	3.3	10.7	7.5	7.8	9.9
0.000425	No. 40	5.5	18.7	13.3	13.2	18.3
2.000	No. 10	12.8	41.4	28.6	34.1	44.3
4.750	No. 4	32.4	64.8	53.2	59.7	65.7
9.500	3/8"	64.6	81.6	72.4	84.9	78.9
12.500	1/2"	78.5	86.2	78.4	92	82.2
19.000	3/4"	90.2	93.1	86.3	98.4	87.3
25.000	1"	95.8	96.9	91.1	100	90.8
37.500	1 1/2"	100	100	100	100	100
50.000	2"	100	100	100	100	100
63.000	2 1/2"	100	100	100	100	100
75.000	3"	100	100	100	100	100
90.000	3 1/2"	100	100	100	100	100
Densidad relativa		2.606	2.683	2.671	2.631	2.593
D50		7.4	3.0	4.4	3.7	27
D80		13.3	9.0	13.8	8.6	10.5
D90		18.9	16.1	23.6	11.7	23.6
Coeficiente de Rugosidad de Manning - Strickler		0.020	0.019	0.020	0.018	0.020

Tabla 7-42. Resultados de las granulometrías del lecho

En las granulometrías del material del lecho, se puede observar que no hay diferencias sustanciales en los resultados de las muestras tomadas en los diferentes sitios de muestreo. Esto, indica que no hay una variación espacial de la composición de los sedimentos en el tramo analizado del cauce del río San Cristóbal.

7.6.4 Datos de entrada al modelo HEC-RAS

Secciones transversales en el cauce del río San Cristóbal

A partir del modelo digital de elevación del terreno, elaborado a partir de la cartografía procesada por la Universidad Nacional de Colombia dentro del marco de este proyecto, se obtuvieron secciones transversales a lo largo del canal,

separadas una distancia de 100 m, con secciones de detalle en los sitios donde se localizan los puentes sobre el cauce. La Figura 7-58 muestra el esquema de localización de las secciones transversales sobre el cauce del río San Cristóbal, de acuerdo al esquema del HEC-RAS.

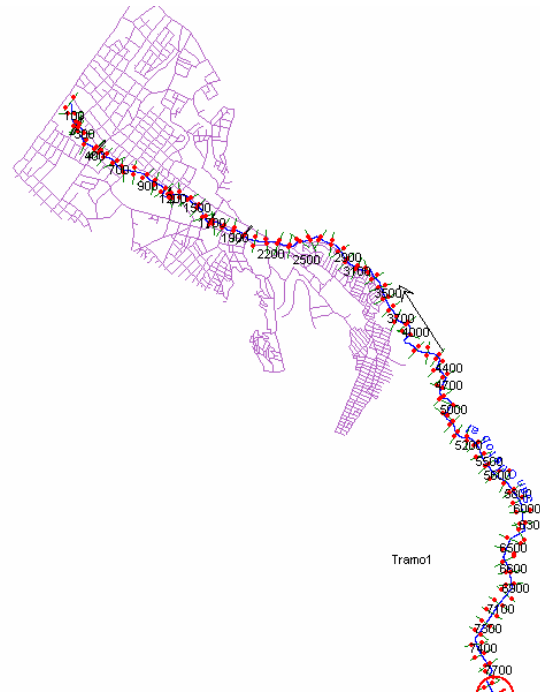


Figura 7-58. Esquema de localización de secciones transversales en el HEC-RAS

La información en detalle de los puentes, se levantó también para este proyecto obteniendo las secciones transversales que se muestran en la Figura 7-59 dichas secciones transversales se incluyeron dentro del esquema para la simulación de niveles con el HEC-RAS.

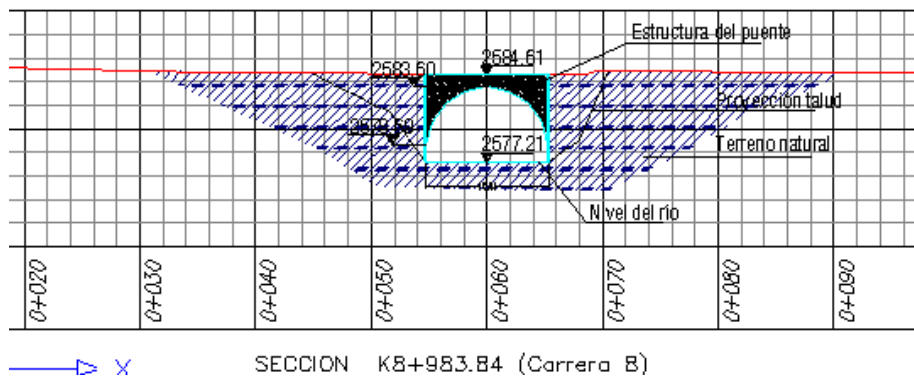
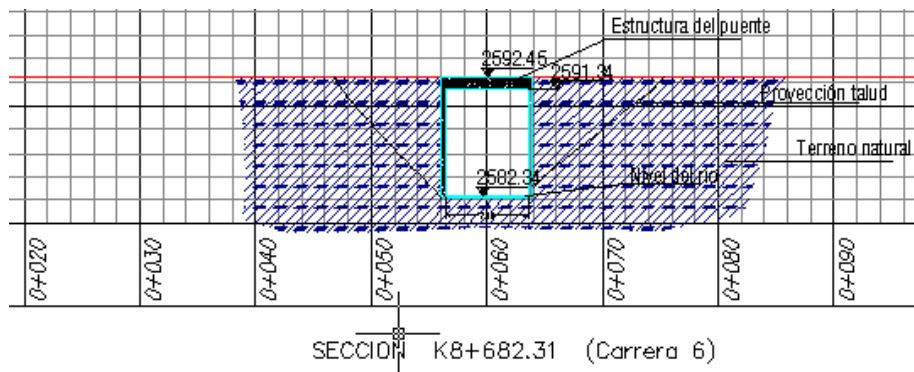
7.6.5 Coeficientes de rugosidad en el cauce

Una forma de obtener un estimativo del coeficiente de rugosidad de Manning en el cauce, puede ser a través de aforos de caudal en distintos puntos de medición. Para el presente estudio, se realizaron aforos de caudal empleando trazadores iónicos (sal común) a fin de lograr obtener un estimativo de dicho parámetro información, que finalmente no se empleó para tal fin, dado que en los hidrogramas de caudal obtenidos en el análisis hidrológico, el valor pico, presenta diferencias sustanciales con respecto al caudal obtenido en las distintas mediciones puntuales, siendo esta una situación poco representativa en los análisis, dado que el coeficiente de rugosidad tiende a cambiar notoriamente en la medida en que se aumenta el caudal.

De los resultados de la calibración hidrológica, para la cuenca alta del río San Cristóbal, se encontró que el coeficiente de rugosidad en el cauce, oscila en valores cercanos a 0.025.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las granulometrías, tomando un diámetro representativo para las partículas del lecho en los sitios de muestreo y empleando la ecuación de Manning - Strickler ($n = 0.038(D90)^{1/6}$, donde D90 se expresa en metros), se calcularon los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, y se encontró que éste, para dichos puntos, varía entre 0.018 y 0.020. Este rango del valor del coeficiente de rugosidad, puede aumentar en presencia de caudales de creciente más altos que los encontrados al momento de la toma de muestras sedimentológicas, razón por la cual se optó por realizar el análisis hidráulico empleando el valor de coeficiente de rugosidad de Manning calibrado con el modelo hidrológico de lluvia – Escorrentía, es decir con un valor de 0.025 que se asume es igual en todo el canal, basados en las pequeñas diferencias que se encontraron en el muestreo sedimentológico.

En la Tabla 7-42 se muestran los valores estimados para el coeficiente de rugosidad de Manning, empleando la ecuación de Manning – Strickler.



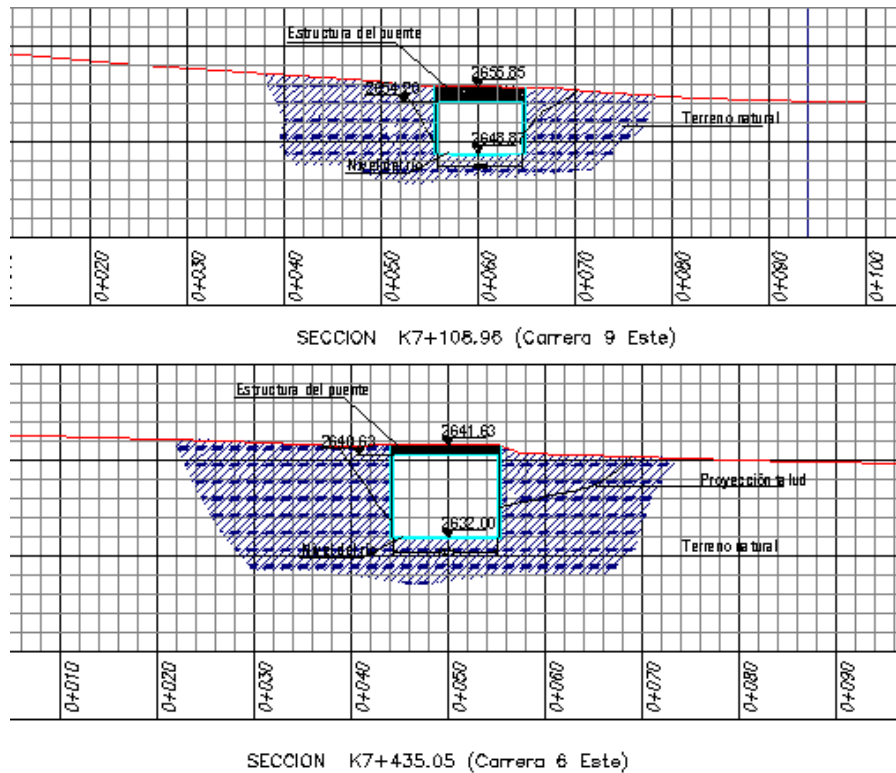


Figura 7-59. Secciones transversales en los puentes

7.6.6 Condiciones de borde

Aguas arriba

Dado que la pendiente del cauce es alta, se presume que el flujo que se pueda presentar en el cauce, sea supercrítico, razón por la cual, para el análisis hidráulico en régimen de flujo permanente gradualmente variado, se optó por colocar una condición de frontera aguas arriba correspondiente a un nivel de profundidad normal del flujo dado que para este canal, el flujo puede alcanzar la condición de flujo uniforme.

Aguas abajo

Igual que en la condición de borde aguas arriba, aguas abajo se decidió establecer también, la condición de flujo uniforme (profundidad normal del flujo). Esta condición de borde se toma de dicha forma, dado que el flujo, por las pendientes que se presentan en el cauce, se presume en régimen supercrítico, es decir, la condición de borde que prevalece es la de aguas arriba. Análisis posteriores

muestran que la profundidad del flujo, justo antes de la entrada al box de la carrera 10, para una condición de caudal de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, es de 1.50 m que comparado con la altura del box (2.8 m), indica que esta estructura no condiciona el flujo.

Las dos condiciones de frontera, tanto aguas arriba como aguas abajo, sugieren la realización de un análisis empleando la opción del programa “flujo mixto”, es decir considerando que se pueda presentar tanto el flujo supercrítico como el flujo subcrítico en el canal.

Caudales para el análisis

Siendo el objetivo del empleo del software HEC-RAS, determinar la capacidad hidráulica del canal, se asumieron caudales para dicho análisis entre 10 y $250 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.6.7 Análisis de niveles y caudales en el Río San Cristóbal

El análisis de niveles en el cauce del río San Cristóbal, empleando el software HEC-RAS, para una condición de flujo permanente gradualmente variado, muestra que en términos generales, para los diversos caudales el flujo en el cauce es supercrítico, es decir, se presentan profundidades pequeñas, con velocidades en el canal altas.

Esta condición del flujo en el canal permite el paso de caudales grandes (en este caso superiores a los $100 \text{ m}^3/\text{s}$), sin que se presenten desbordamientos que afecten considerablemente a la población en la parte baja de la zona de estudio.

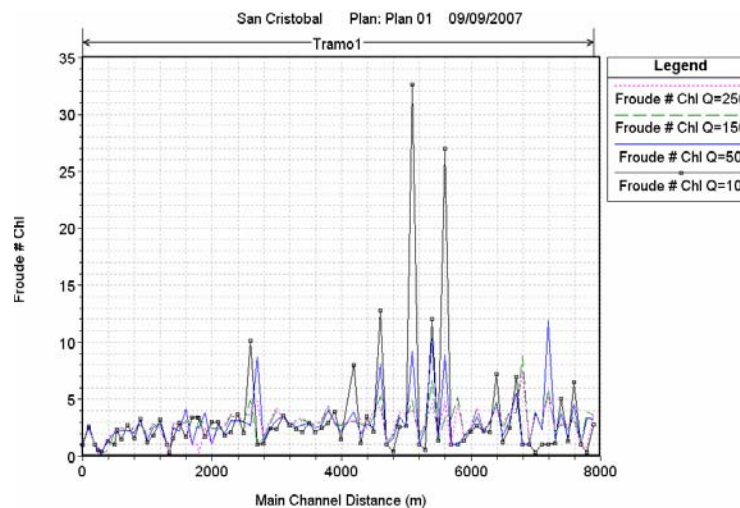


Figura 7-60. Variación del número de Froude a lo largo del canal

Como se puede apreciar en la Figura 7-60, en términos generales el régimen del flujo en el canal es supercrítico con números de Froude entre 1 y 5; esto implica, que por la pendiente del cauce, hay puntos en los cuales la velocidad promedio de la sección, presenta valores considerablemente altos para un caudal de $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

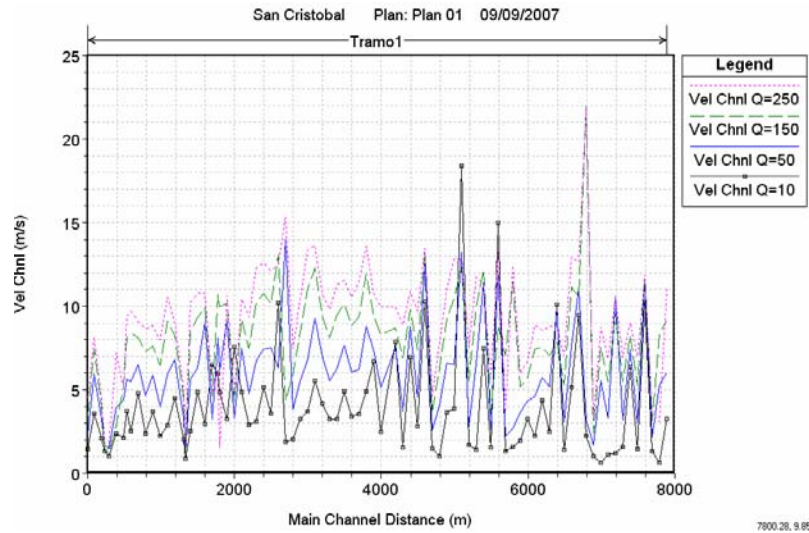
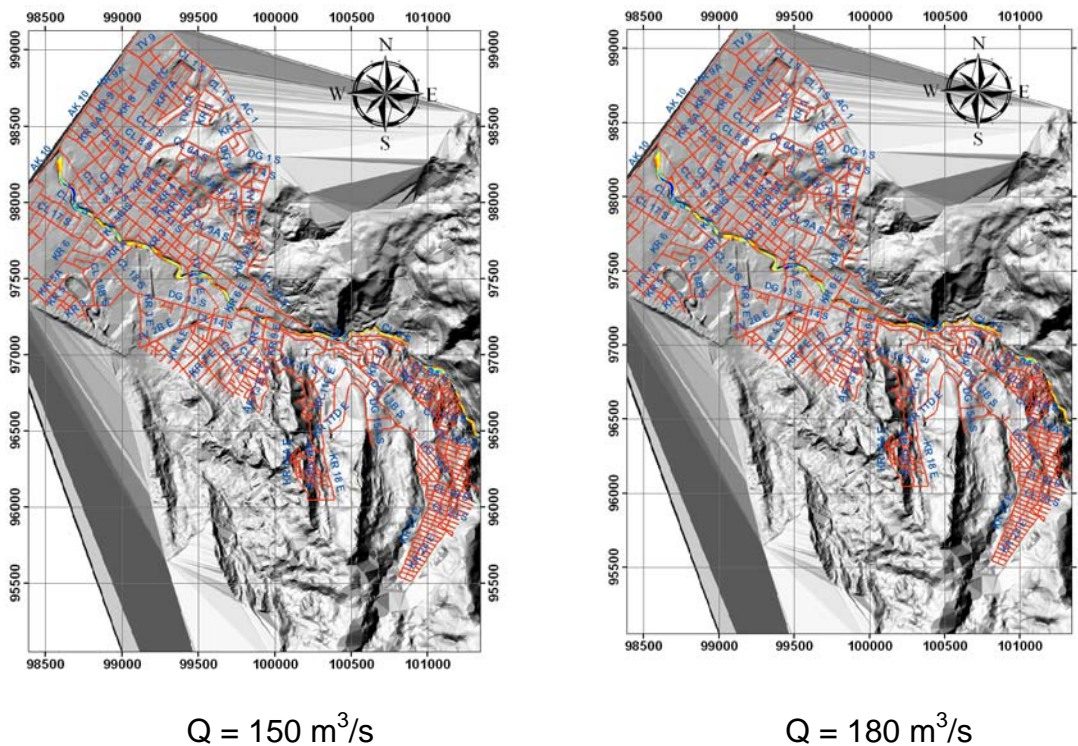
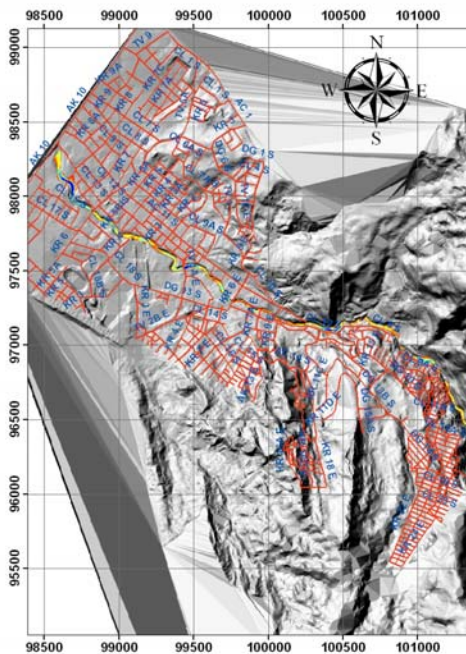
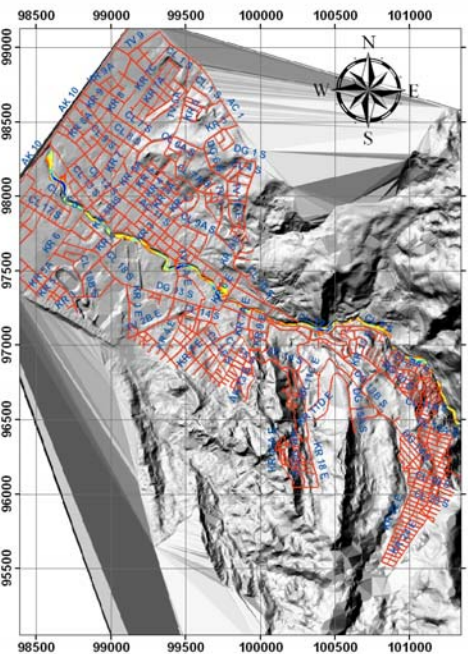


Figura 7-61. Variación de la velocidad promedio a lo largo del canal





$Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$

7.6.8 Capacidad hidráulica de las estructuras sobre el cauce del Río San Cristóbal

Para cada una de los puentes localizados en el tramo del río San Cristóbal, en su parte urbana, se revisó la capacidad hidráulica de cada uno, empleando el modelo HEC-RAS, aplicado a todo el cauce del río. Estas simulaciones se realizaron empleando las características mencionadas anteriormente y los resultados son los siguientes.

Puente localizado en la carrera 8ª

De acuerdo a los resultados obtenidos para este puente, es posible apreciar, que con caudales superiores a los $150 \text{ m}^3/\text{s}$, la estructura empieza a trabajar sumergida, y el flujo tiende a pasar por encima, es decir por la calzada sobre el puente; caudales superiores o iguales a $180 \text{ m}^3/\text{s}$ generan un remanso entre este puente y el localizado en la carrera 6ª hacia aguas arriba, situación que de acuerdo a la modelación, no genera desbordamientos en el tramo hacia aguas arriba, ni controla el flujo en la estructura de la carrera 6ª. Hacia aguas abajo de este puente, el flujo continúa con régimen supercrítico.

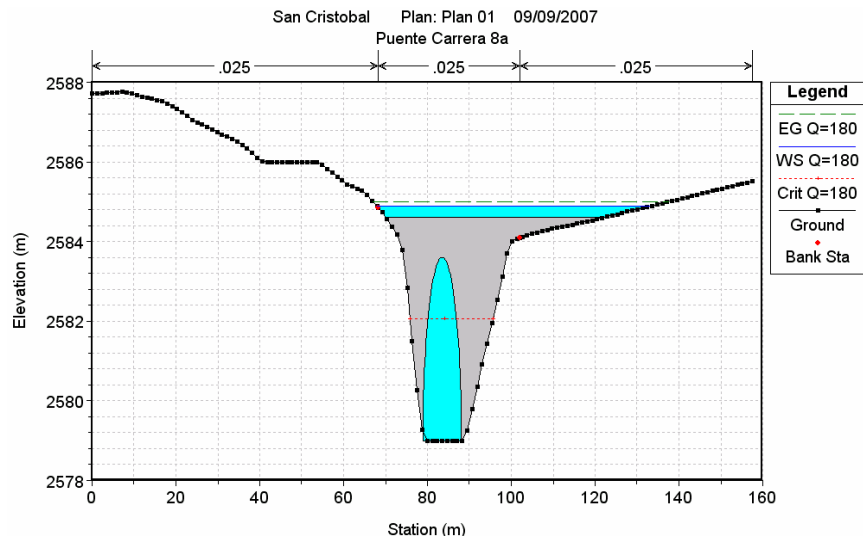


Figura 7-62.. Sección transversal del puente de la carrera 8ª

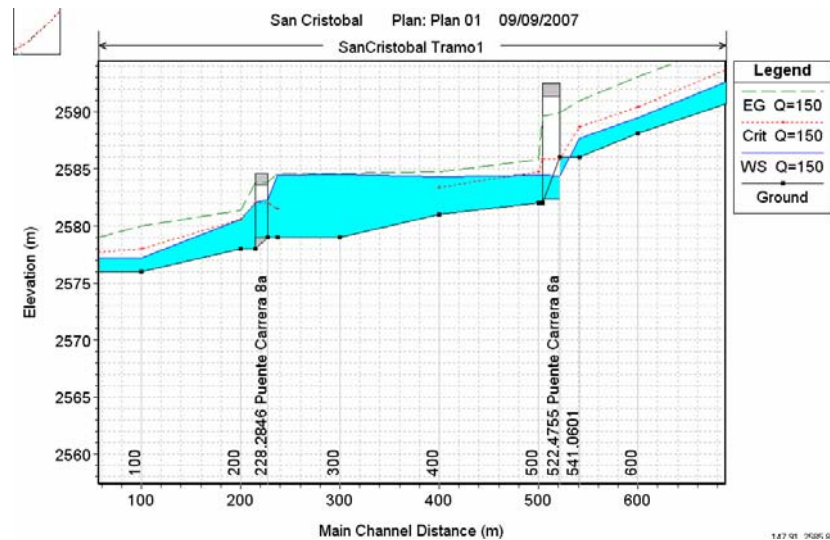


Figura 7-63.. Perfil longitudinal puentes carrera 8ª y carrera 6ª

Para este puente, la curva de calibración nivel - caudal, se muestra en la Figura 7-64. Aquí se puede apreciar, que la cota superior de la alcantarilla (2583.60 m.s.n.m.), se alcanza para un caudal aproximado de 130 m³/s. de igual forma, la cota del pavimento sobre el puente (2584.61 m.s.n.m.) se alcanza para un caudal de 160 m³/s.

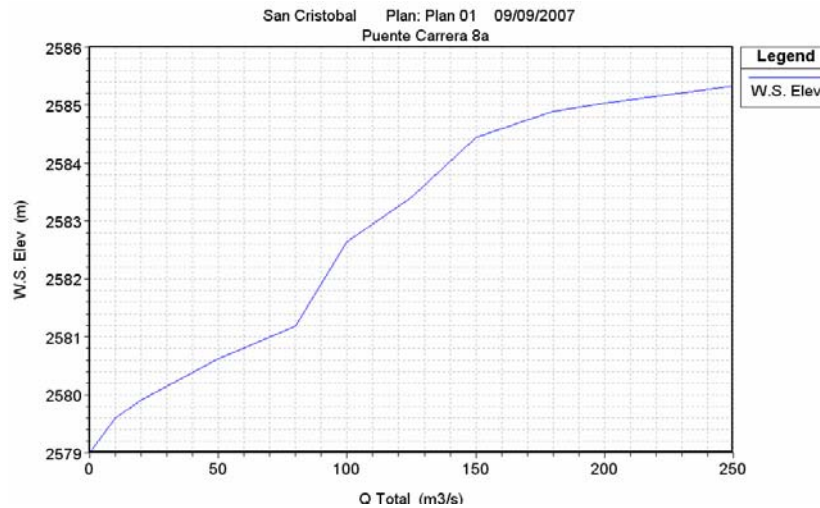


Figura 7-64. Curva nivel Vs. caudal puente carrera 8^a

Puente localizado en la carrera 6^a

Esta estructura no presenta ningún problema de capacidad en un rango de caudales hasta 250 m³/s. Esto, debido a la diferencia de nivel existente entre la entrada y la salida de dicha estructura. La curva de calibración para esta estructura (Figura 7-65), muestra que la cota máxima alcanzada para el caudal de 250 m³/s, fue de 2586 m.s.n.m., muy inferior a la cota de la corona de la estructura (2591.34 m.s.n.m.).

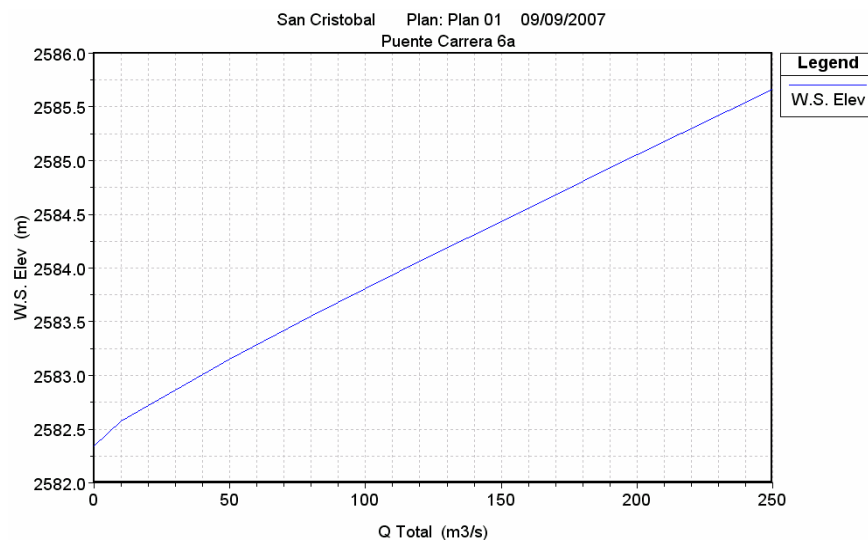


Figura 7-65. Curva nivel Vs. caudal puente carrera 6^a

De igual forma, la sección transversal de la muestra la gran diferencia existente entre la lámina de agua, y la parte superior de la estructura de cajón del puente. Al presentarse un régimen de flujo supercrítico, hacia aguas arriba del puente, excepto si se produce una obstrucción en la sección transversal de la alcantarilla, no habrá control del flujo por dicha estructura.

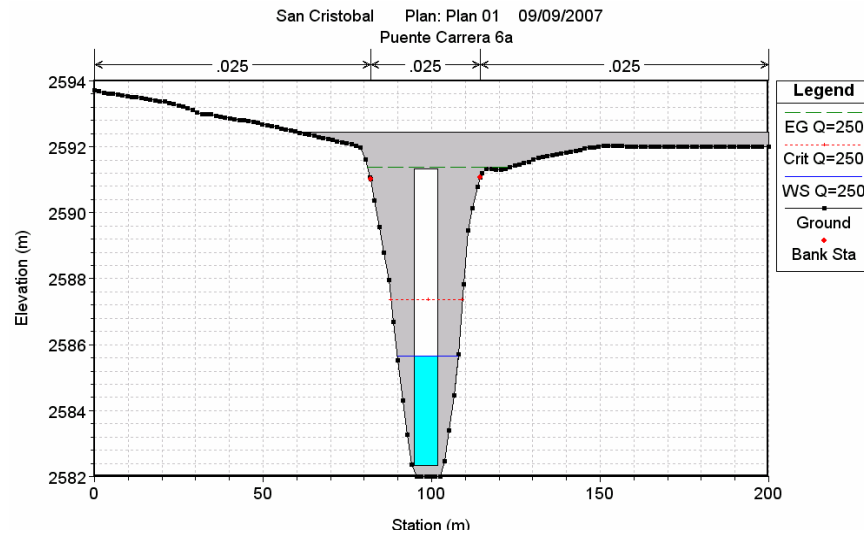


Figura 7-66. Sección transversal del puente de la carrera 6^a

Puente localizado en la carrera 1^a Este

Este puente, que presenta un gálibo 5 m por encima del lecho del cauce con una sección transversal relativamente pequeña, alcanza la cota 2618.23 m.s.n.m., con un caudal de 120 m³/s, diciendo esto que para caudales superiores, la alcantarilla estará sumergida.

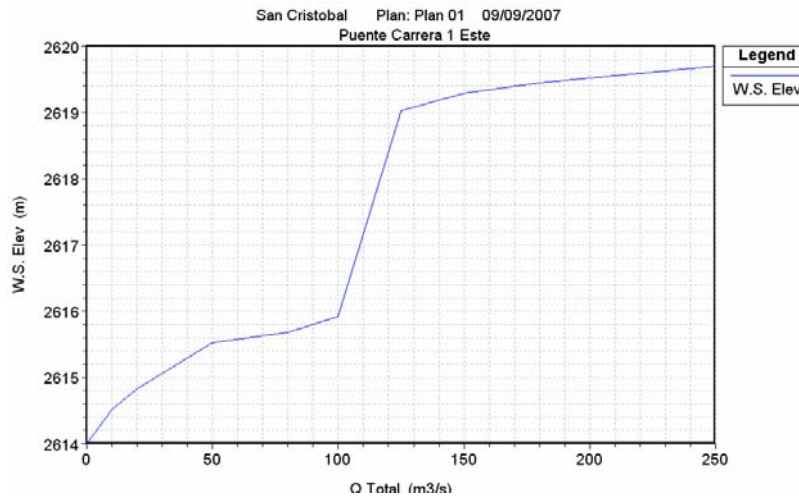


Figura 7-67. Curva nivel Vs. caudal puente carrera 1ª Este

En el perfil longitudinal se puede apreciar que el caudal de 250 m³/s excede considerablemente la capacidad de la estructura, formando un remanso 100 m hacia aguas arriba del puente, sin ocasionar desbordamiento en las secciones de este tramo.

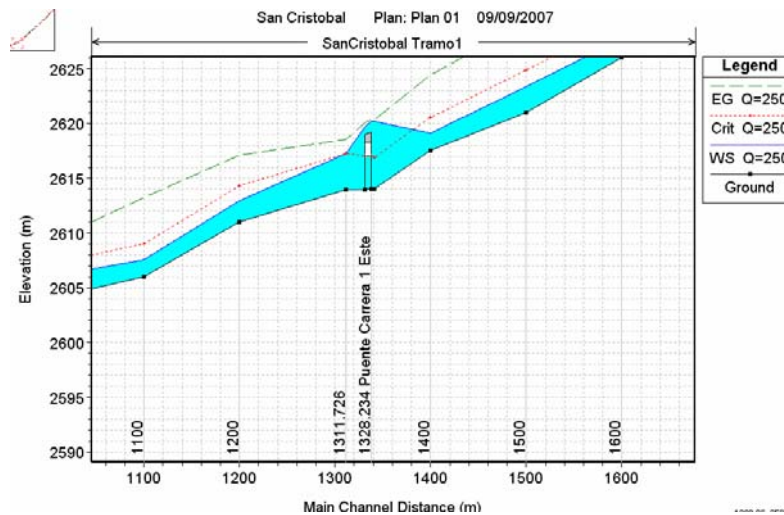


Figura 7-68. Perfil longitudinal puente carrera 1ª Este

Puente localizado en la Carrera 6ª Este

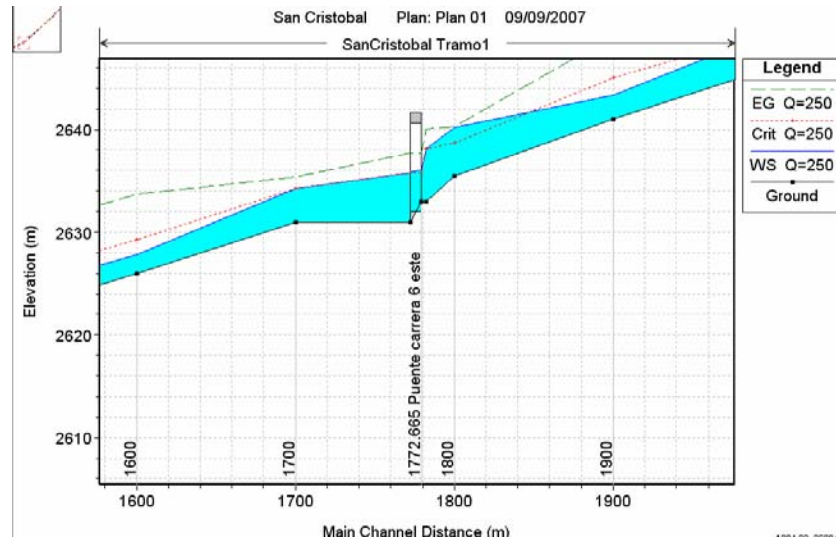


Figura 7-69. Perfil longitudinal puente carrera 6ª Este

Esta estructura, al igual que la localizada en la carrera 6ª, no presenta ningún problema por capacidad hasta un caudal de $250 \text{ m}^3/\text{s}$. en la Figura 7-70, se puede apreciar, que el flujo pasa por la sección transversal de esta alcantarilla, con una profundidad muy por debajo de su cota superior, y muy por debajo de la rasante del pavimento.

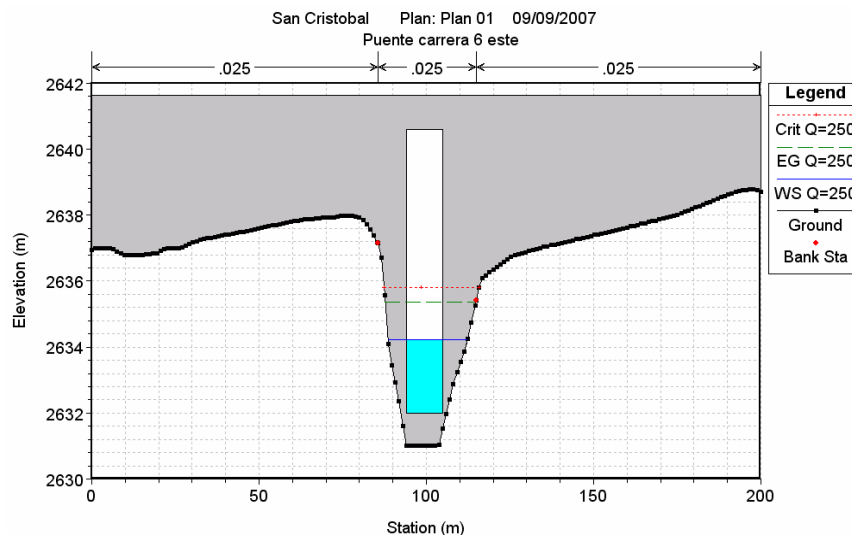


Figura 7-70. Sección transversal del puente de la carrera 6ª Este

Las curva de calibración muestra que para el caudal máximo del análisis, el flujo alcanza un nivel de 2634 m.s.n.m., cinco metros por debajo de la cota superior de la estructura (2640.63 m.s.n.m.).

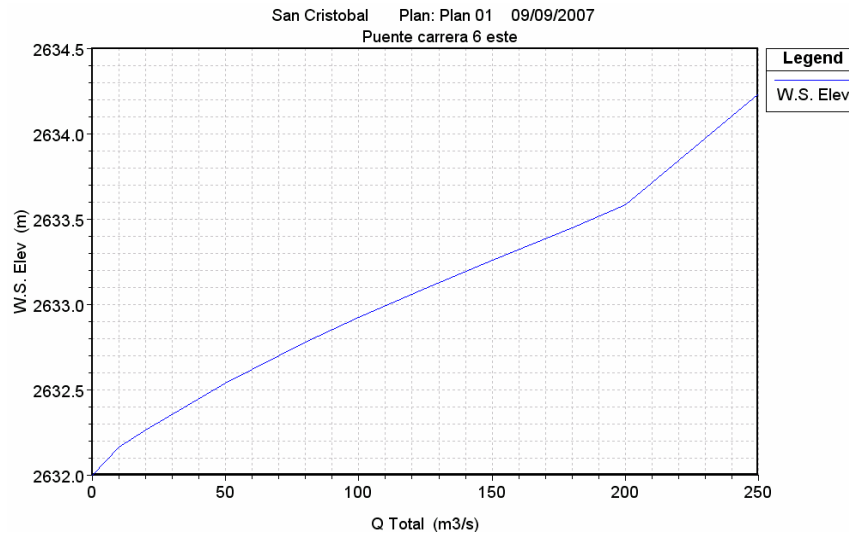


Figura 7-71. Curva nivel Vs. caudal puente carrera 6ª Este

Puente localizado en la carrera 9ª Este

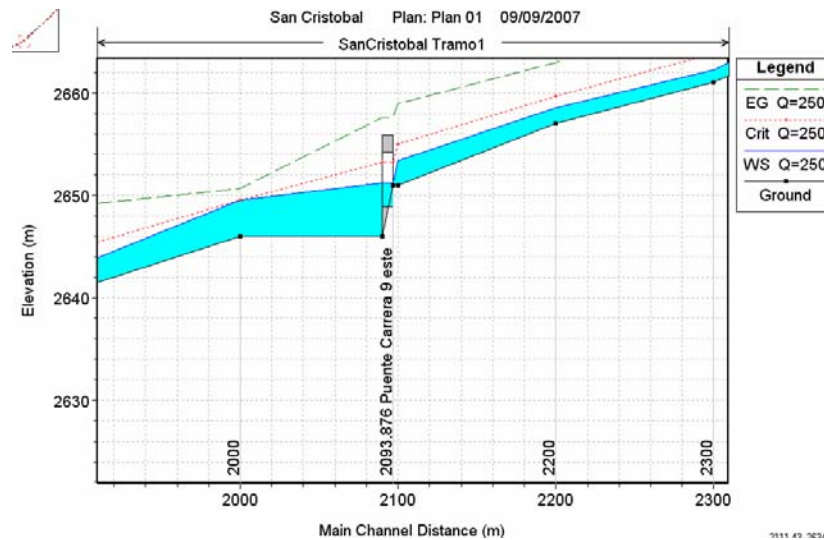


Figura 7-72. Perfil longitudinal puente carrera 9ª Este

Esta estructura, no presenta problemas de capacidad hidráulica, debido a la alta pendiente del cauce, en el tramo donde está localizada. De igual forma, para el máximo caudal empleado en este análisis, la estructura presenta una lámina de agua tres metros por debajo de la cota superior de la alcantarilla.

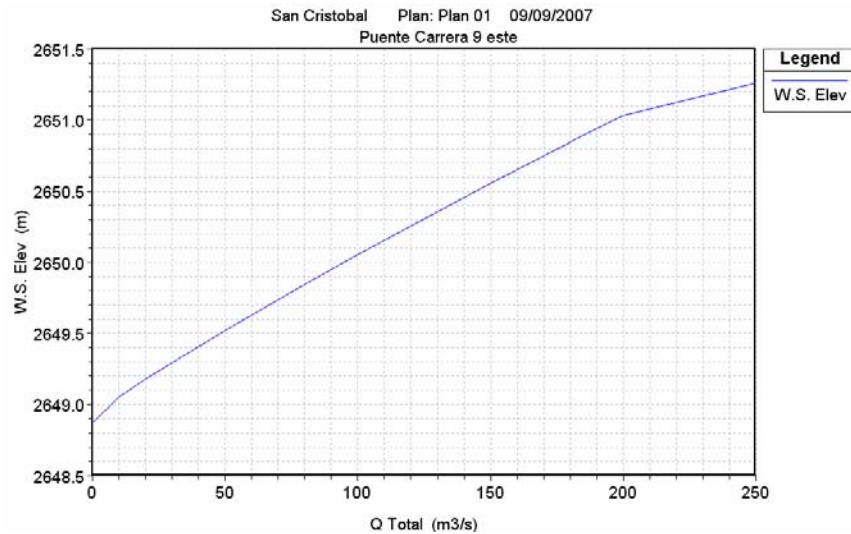


Figura 7-73. Curva nivel Vs. caudal puente carrera 9^a Este

7.7 Modelación matemática del flujo empleando el software flo-2D

7.7.1 Escenarios de modelación

Para la modelación matemática con FLO-2D, se plantearon varios escenarios, a fin de establecer la amenaza por inundación, en la zona de influencia de este estudio con agua y sedimentos. Tales escenarios que se describen a continuación mostrarán el comportamiento del flujo para los períodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años de eventos de lluvia, analizando el paso del flujo no sólo por el cauce del río San Cristóbal, sino también en las quebradas Ramajal, El Triangulo La Pichosa y Vitelma, que se tuvieron en cuenta debido a que son las quebradas que presentan en su zona de manejo ambiental, asentamientos humanos.

Escenario I: se considerará el flujo de agua sin sedimentos

Escenario II: se considerará el flujo de agua con sedimentos producidos por erosión en el área de la cuenca (volúmenes calculados empleando la formula de perdida universal de suelo – USLE).

Escenario III: Se considera el flujo de agua con sedimentos producidos por la falla de los taludes del cauce (inestabilidad en las bancas), sumando al aporte producido por erosión en el área de la cuenca. Es importante anotar que para este escenario sólo se simuló el comportamiento del flujo en el cauce del río y sin incluir los parámetros que relacionan el

esfuerzo de cedencia y la viscosidad del flujo con la concentración de sólidos en proporción del volumen total.

Escenario IV: Se considera el flujo de agua con un aporte de sedimentos producidos por deslizamientos en las laderas, y se asume que el flujo varía su viscosidad y su esfuerzo de cedencia con respecto a la concentración de sólidos.

Escenario V: Para la condición más crítica de las cuatro anteriores, se plantearán alternativas de obras para la mitigación de la amenaza.

Escenario VI: Represamiento del flujo y rompimiento del dique generado por un deslizamiento.

Con respecto a la quebrada Ramajal, la cual en gran parte de su longitud es conducida por un tubo, esta fue simulada teniendo en cuenta un escenario absolutamente crítico, en el cual la tubería se obstruye totalmente y el flujo busca el paso según condiciones topográficas de la zona. El entubamiento de dicha quebrada, no es posible simularlo en el software FLO-2D dado que este programa no está diseñado para simular el comportamiento en tuberías, lo que constituye también una de sus limitantes. De igual forma, dada la presencia de un flujo con altas concentraciones de sedimentos, no se descarta una posible obstrucción que genere un escenario como el planteado en esta investigación para las quebradas Ramajal y Vitelma.

7.7.2 Datos de entrada al modelo

Modelo Digital de Elevación del Terreno

Para realizar las simulaciones con el software, se empleó nuevamente el modelo digital de elevación del terreno a partir de las curvas de nivel procesadas por el grupo de trabajo de la Universidad Nacional de Colombia, en el marco de este proyecto.

Para la simulación se empleó una malla de cálculo de celdas cuadradas cuya longitud es de 10 m, para un total de aproximadamente 16.000 celdas. Valores más pequeños del tamaño de la malla, generan un mayor número de celdas de cálculo, aumentando notoriamente el requerimiento computacional.

Caudales de entrada al modelo

Los análisis hidrológicos en la cuenca, suministraron los hidrogramas de caudal líquido de cada una de las subcuencas que componen la cuenca del río San

Cristóbal. Estos aportes líquidos, sirven como dato de entrada al modelo matemático FLO-2D. Dichos análisis determinaron los hidrogramas de caudal para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 70, 90 y 100, periodos para los cuales se realizaron las simulaciones del flujo.

Parámetros para la estimación de los esfuerzos cortantes y la viscosidad del flujo en términos de la concentración de sólidos

Para la obtención de estos parámetros, se emplearon las hidrometrías del lecho, y en particular aquella que se realizó sobre el cauce del río en la parte media de la cuenca y que corresponde al Vertedero El Delirio. Esta información se comparó con datos reportados en la literatura, a fin de obtener por similitud dichos parámetros.

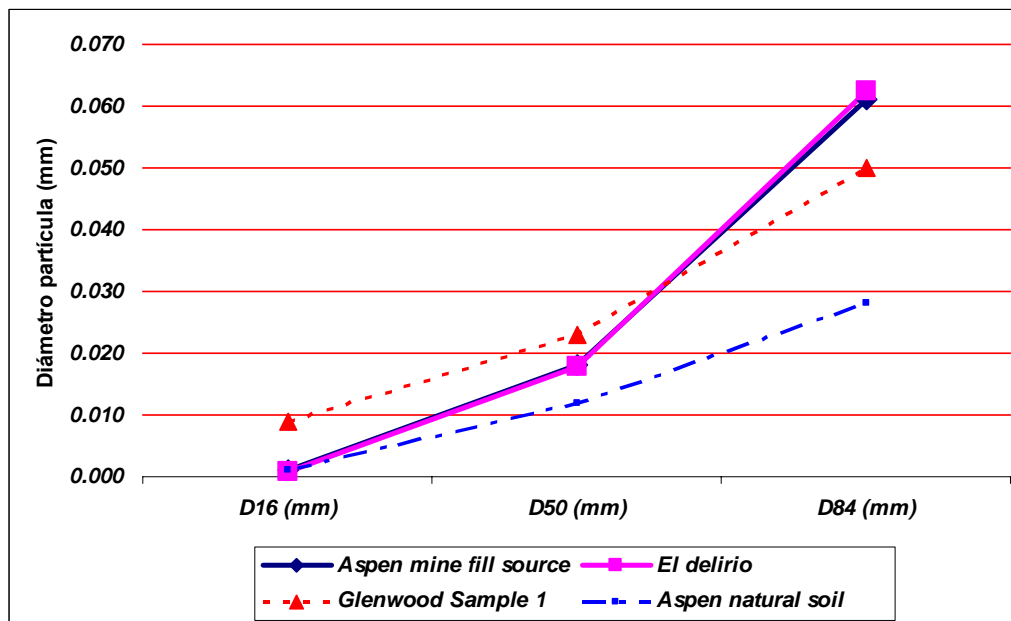


Figura 7-74. Comparación de resultados de hidrometrías

O'Brien et.al. (1988), presentaron en una publicación de la ASCE, los resultados obtenidos del análisis reológico de diferentes muestras tomadas en cauces donde se han presentado flujos, y relacionaron dichos resultados con los análisis de materiales finos (Tabla 7-43). Al comparar estos resultados con los obtenidos en la hidrometría realizada al material del lecho en el vertedero El Delirio, se encontró una gran similitud entre estos resultados y los de la Mina en Aspen. Dicha comparación, se presenta en la Figura 7-74.

	Arcilla (%)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	Límite líquido	Índice plástico	A2	B2	A1	B1
Glenwood Original	4.8	0.010	0.034	0.062						
Glenwood Sample 1	6.8	0.009	0.023	0.050			0.0345	20.1	0.00283	23
Glenwood Sample 2	3.0	0.016	0.035	0.061			0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood Sample 3	4.8	0.011	0.025	0.053			0.00071	29.8	0.00632	19.9
Glenwood Sample 4	7.6	0.001	0.018	0.032			0.00172	29.5	0.0006	33.1
Aspen Pit 1	31.3	0.001	0.011	0.032	0.32	0.11	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen natural soil	27.0	0.001	0.012	0.028	0.25	0.06	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen mine fill	27.8	0.001	0.013	0.030	0.24	0.06	0.0473	21.1	0.128	12
Aspen natural soil source	31.6	0.001	0.016	0.039			0.0383	19.6	0.0005	27.1
Aspen mine fill source	25.2	0.001	0.018	0.061			0.291	14.3	0.0002	33.1

Tabla 7-43. Datos tomados por O'Brien et. al. (1988)

Por tal razón, para el análisis de flujos viscosos que corresponde al escenario IV, se asumirá que los parámetros que relacionan los esfuerzos cortantes con la concentración de sólidos, son los siguientes:

Coefficiente para el cálculo de los esfuerzos cortantes en el flujo: $\alpha_2 = 0.291$ dinas/cm²

Exponente para el cálculo de los esfuerzos cortantes en el flujo: $\beta_2 = 14.3$

Coefficiente para el cálculo de la viscosidad del flujo: $\alpha_1 = 0.0002$ poises

Exponente para el cálculo de la viscosidad del flujo: $\beta_1 = 33.1$

7.7.3 Consideraciones generales para las simulaciones

A continuación se enumeran las características principales que se tuvieron en cuenta para la realización de las simulaciones del flujo, con FLO-2D:

- El tiempo de simulación es de 24 horas, dado que los hidrogramas estimados en el análisis hidrológico presentan una duración de máximo 6 horas, y el tiempo restante se deja para permitir que todo el flujo pase por la sección más aguas debajo de la zona estudiada.
- La Zona para la cuál se establece la malla de cálculo, corresponde solamente a un área cercana al cauce del río (o de las tres quebradas que se analizaron, La Pichosa, El triangulo y Ramajal), para reducir el número

de celdas en la malla de cálculo, que se refleja de igual forma en el tiempo computacional.

- No se analiza un modelo para cada una de las subcuencas que componen la cuenca alta del río San Cristóbal. Los aportes de cada una de ellas, se tienen en cuenta en la confluencia al cauce principal de este río.
- Para las simulaciones, se tomo como condición de borde aguas abajo, nodos o celdas que permitiesen el paso del flujo hacia aguas abajo del dominio computacional, es decir, celdas que evacuan los volúmenes del flujo.
- No se tuvieron en cuenta para las distintas simulaciones la estructura canal, dado que por el detalle de la información cartográfica, es conveniente trabajar con el modelo digital que interpola el FLO-2D para una malla de cálculo con celdas cuadradas de 10 metros de lado. El trazado del canal solo se tuvo en cuenta en las simulaciones realizadas para el planteamiento de obras de mitigación en las quebradas El Triangulo y La Pichosa.
- Dado que no se conoce por ninguna fuente bibliográfica, la forma como se comporta la concentración de sólidos en función del tiempo, en presencia de un evento de flujo, se supuso que la distribución de esta a nivel temporal, era constante, es decir es constante a lo largo del evento de flujo.
- Para cada escenario de simulación se contó con ciertos volúmenes de sólidos estimados acuerdo al evento detonante, y que al ser sumadas, generan un evento crítico y que se analiza en el escenario IV. Para cada una de estas simulaciones, se realizó una caracterización del tipo de flujo de acuerdo con las concentraciones máximas alcanzadas.

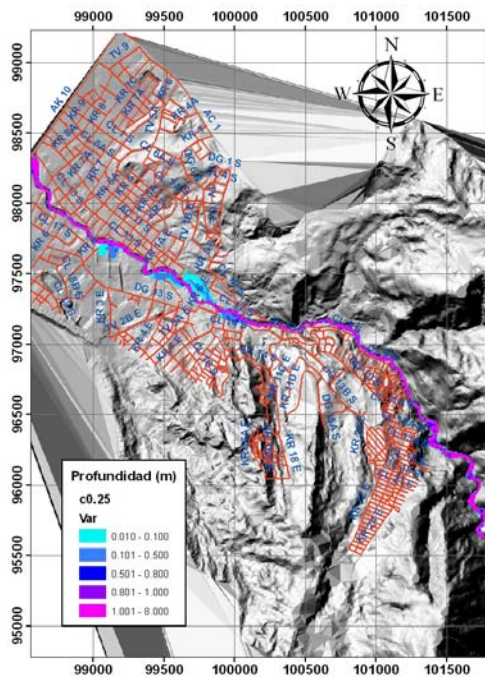
7.7.4 Análisis de sensibilidad del modelo FLO-2D a los cambios en la concentración de sólidos

Dado que se requiere conocer en la cuenca, como es el comportamiento del cauce del río San Cristóbal, frente a eventos de flujos de lodos, donde las concentraciones de sólidos en volumen son superiores a 0.25 (se tomaron valores de 0.25, 0.30, 0.33, 0.35, 0.40 y 0.42 para la concentración de sólidos, valores muy por encima de los estimados para esta cuenca). A continuación se presentan los análisis realizados a fin de conocer acerca de dicho comportamiento.

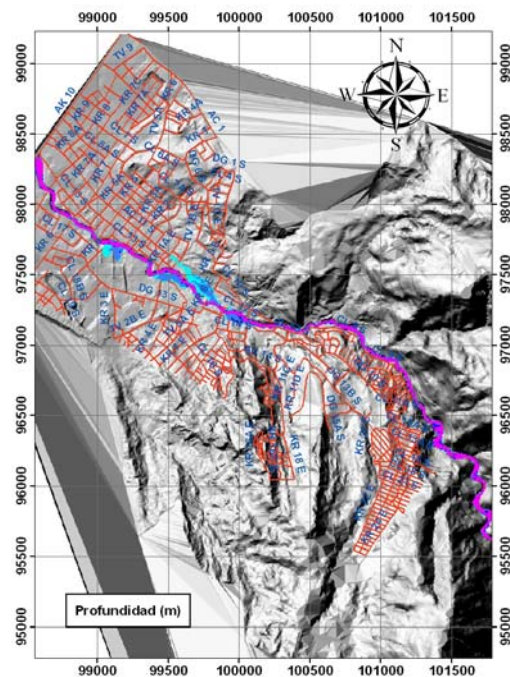
Dado que las concentraciones reales obtenidas para la cuenca, como se verá en los escenarios de análisis, no fueron superiores a 0.25, no se consideró para el análisis de sensibilidad, los cambios en los parámetros reológicos, dado que de

antemano se sabe que estos no van a cambiar en un evento probable a presentarse en la cuenca dadas la bajas concentraciones. Es de anotar, que estos parámetros cambian exponencialmente con respecto a los cambios en la cocentración de sólidos, y su influencia es considerable, si se presentan concentraciones mayores a 0.25.

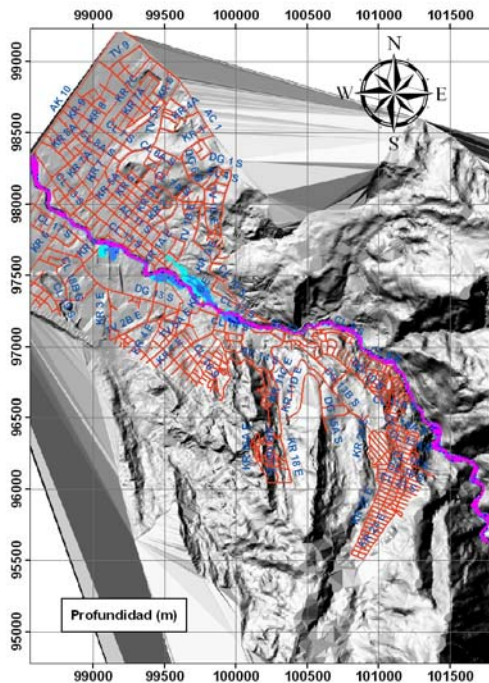
Para las simulaciones realizadas en esta sección, se trabajó con los caudales que se presentan en la siguiente figura, y se supuso una concertación de sólidos proporcional a la distribución del hidrograma de caudal líquido; además se supuso un evento poco probable, donde hay presencia de flujos de lodos en todas las subcuencas que drenan al cauce del río.



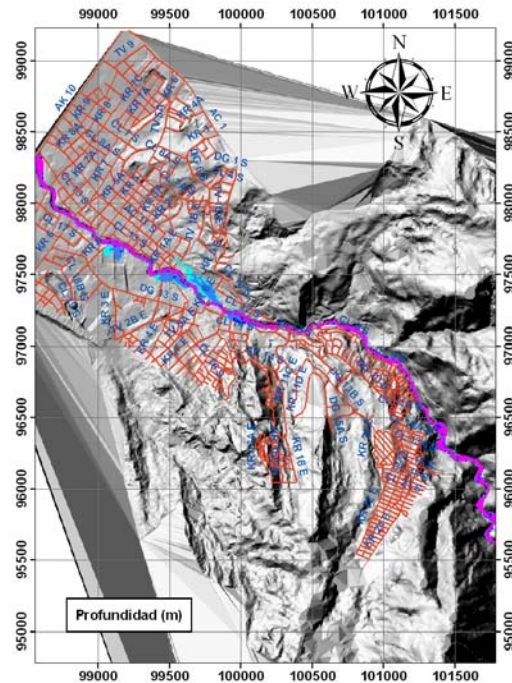
Concentración de sólidos de 0.25



Concentración de sólidos de 0.30



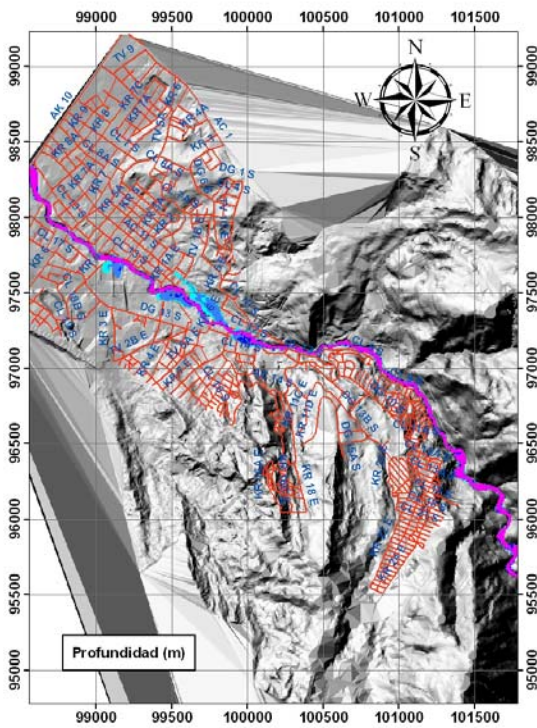
Concentración de sólidos de 0.33



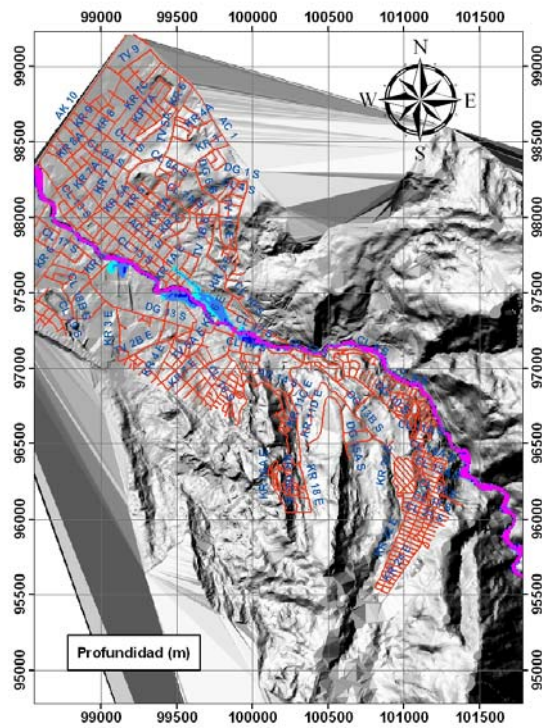
Concentración de sólidos de 0.35

De acuerdo con lo observado en los resultados correspondientes a las distintas simulaciones, se puede apreciar, que un cambio en la concentración de sólidos, para este cauce, no implica cambios grandes y considerables frente a las zonas de inundación. Esto, se puede ver en las figuras que se muestran para las distintas simulaciones, donde solamente un pequeña mancha de inundación entre las carreras 7E y 2BE, entre las cuales el flujo se desborda con profundidades no superiores a los 0.50 m.

En cuanto al flujo en el cauce, para todos los eventos simulados de concentraciones de sólidos, la profundidad permaneció entre 1 y 8 m, pero con el flujo confinado en el cauce. Esto se debe al régimen del flujo que en este caso es supercrítico, con altas velocidades pero profundidades pequeñas.



Concentración de sólidos de 0.40



Concentración de sólidos de 0.42

7.7.5 Escenario I

Este escenario considera el flujo de agua sin sedimentos producidos en la cuenca, es decir, el flujo de agua limpia.

Hidrogramas de caudal empleados para la simulación

Los hidrogramas de caudal empleados para esta simulación son los obtenidos en los análisis hidrológicos, para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Resultados de las simulaciones para el Escenario I

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones con el software FLO-2D, para los diferentes periodos de retorno (3, 5, 10, 25, 50 y 100 años), para los diferentes escenarios que se plantearon en la sección anterior.

Como se puede apreciar en las figuras 7-75 a 7-77, no hay una variación significativa en las zonas inundadas por el flujo de agua, no sólo en el cauce del río San Cristóbal, sino también en las tres quebradas que atraviesan la zona urbana. De igual forma, en el cauce del río se puede apreciar que hay un aumento en la profundidad al aumentar el caudal, pero sin que exista desbordamiento ya que el cauce tiene suficiente capacidad hidráulica.

En cuanto a las diferentes quebradas, la quebrada La Pichosa presenta un pequeño desborde en una franja de aproximadamente 50 m a lado y lado del eje principal. Sin embargo, en esta zona, las profundidades no exceden los 10 cm, para todos los periodos de retorno. En el cauce principal de esta quebrada, se presentan profundidades cercanas a 1 m, con velocidades cercanas a 1.7 m/s.

En el caso de la quebrada El Triangulo ya que presenta un área de drenaje pequeña, y al ser los caudales relativamente pequeños en comparación con las quebradas La Pichosa y Ramajal, presenta profundidades menores a los 0.30 m con velocidades en el cauce principal superior a los 2.0 m/s, debido a la alta pendiente que tiene este cauce.

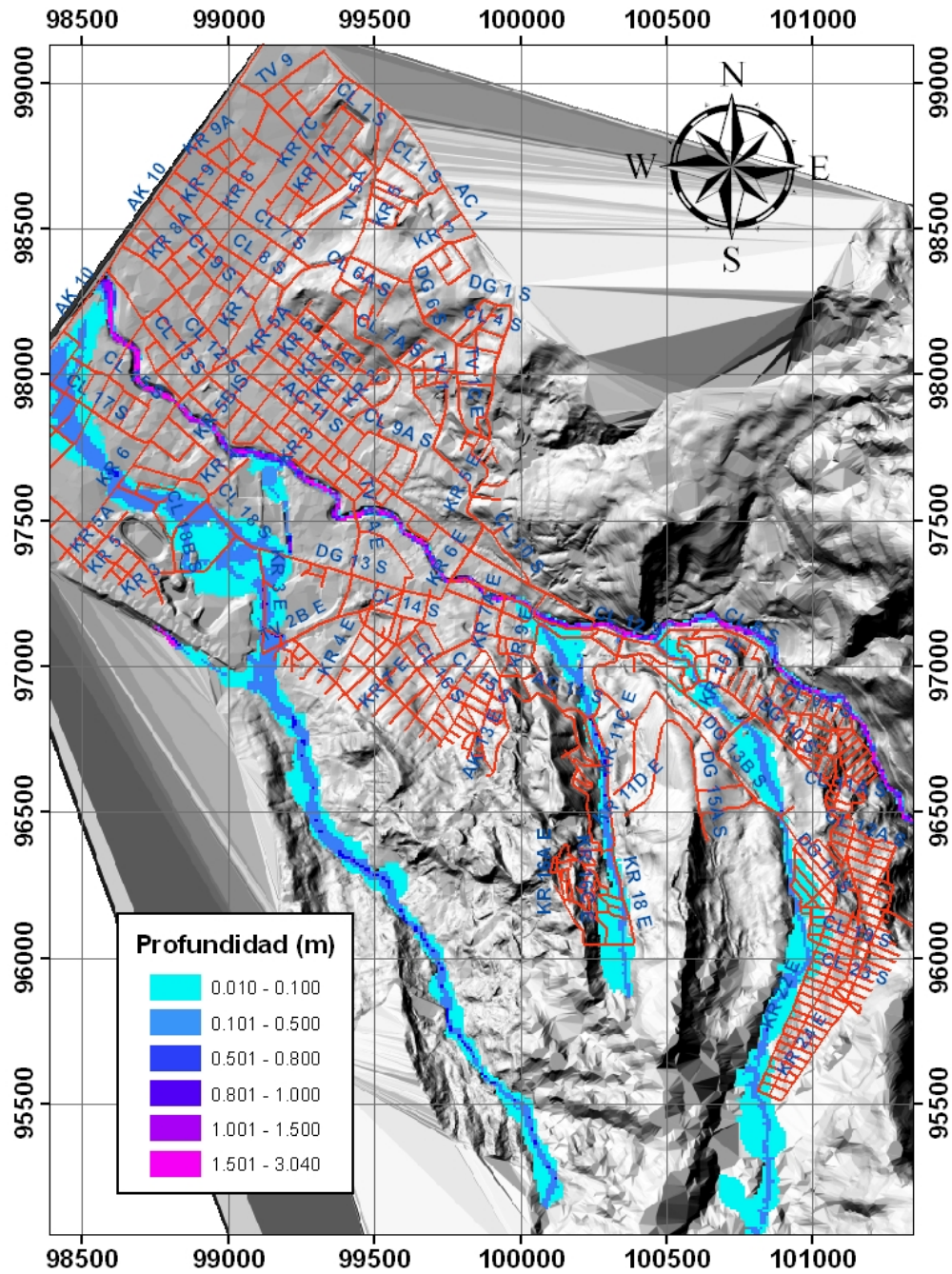


Figura 7-75. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=3$ años)

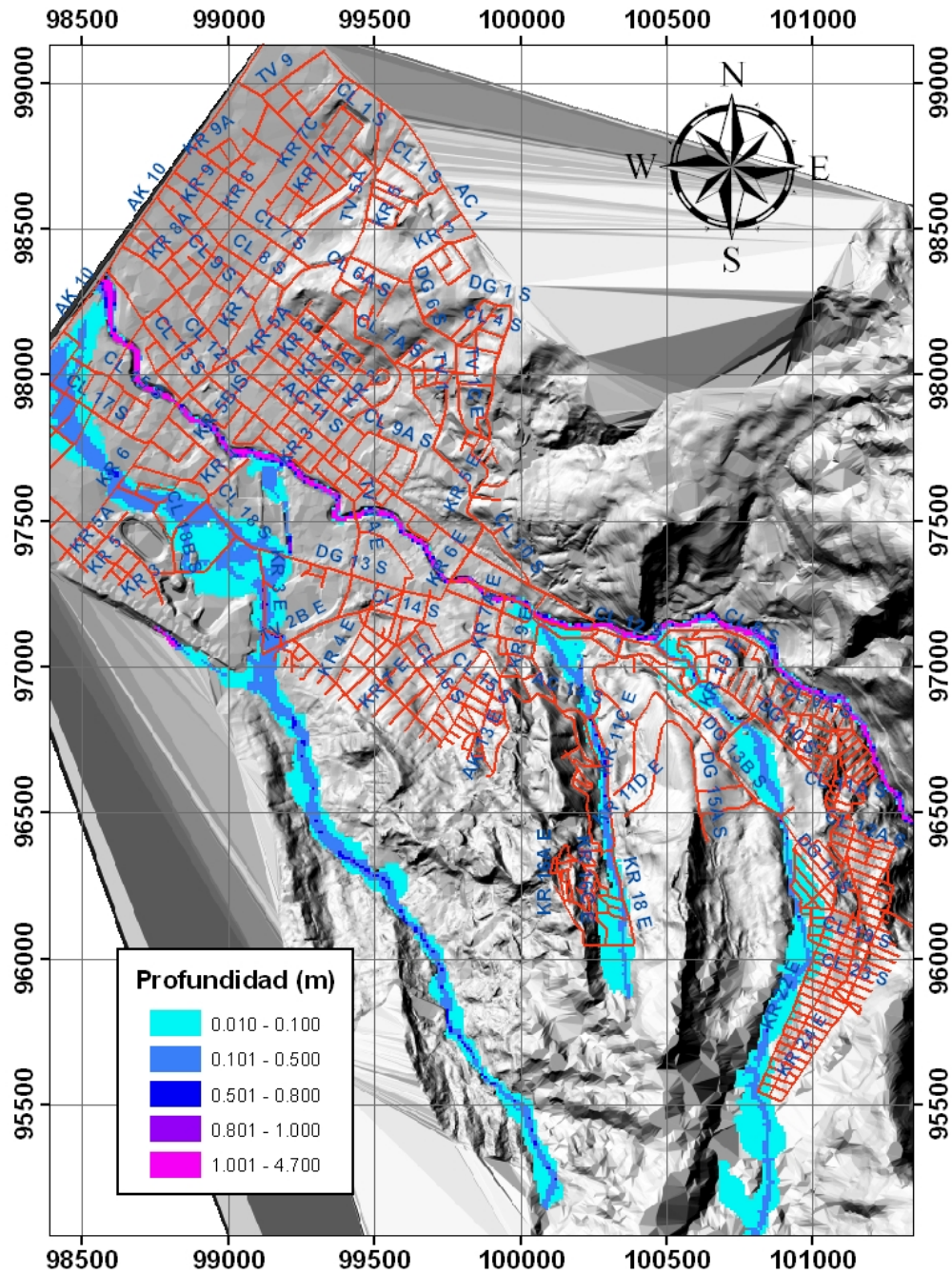


Figura 7-76. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=5$ años)

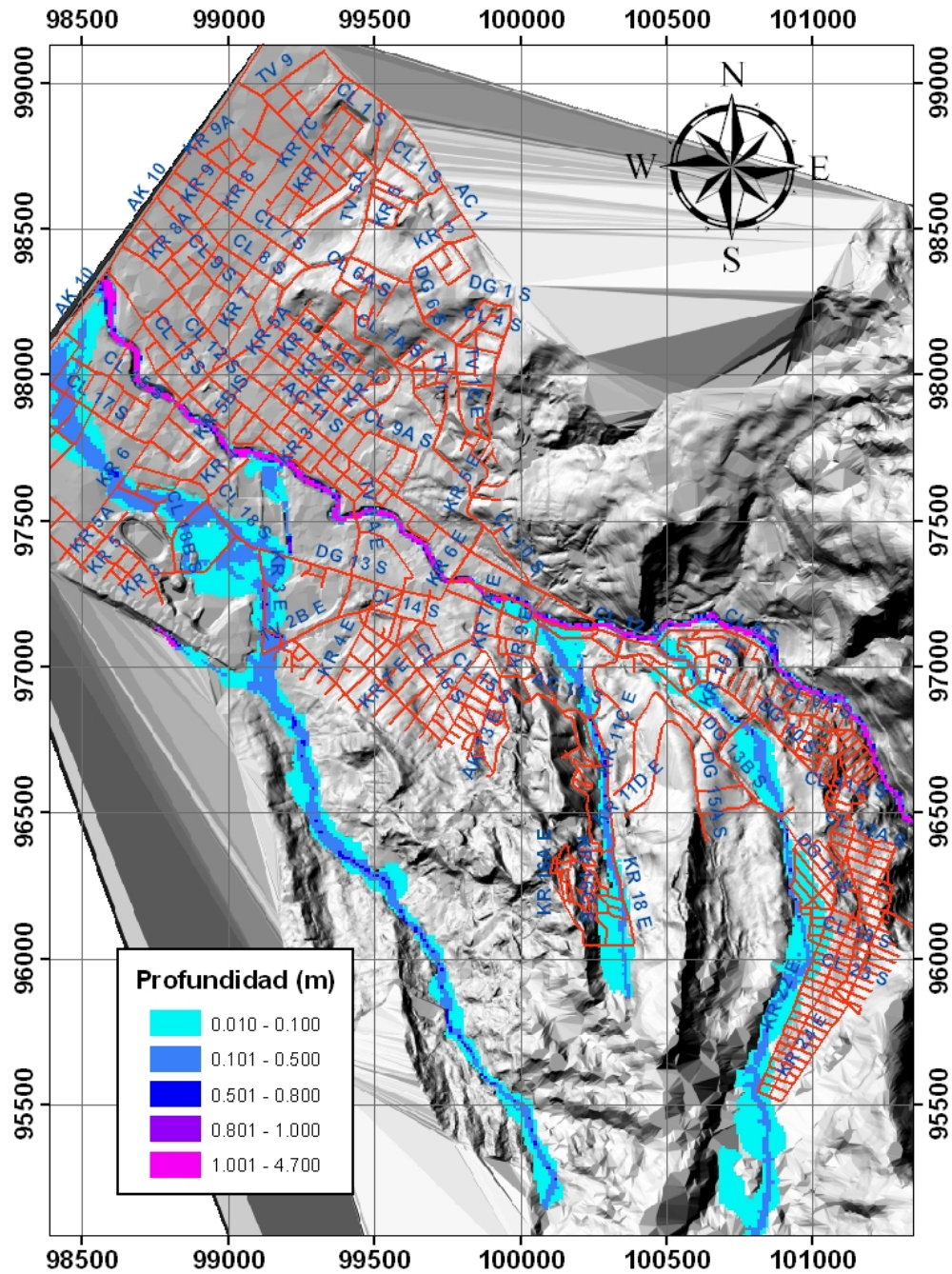


Figura 7-77. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=10$ años)

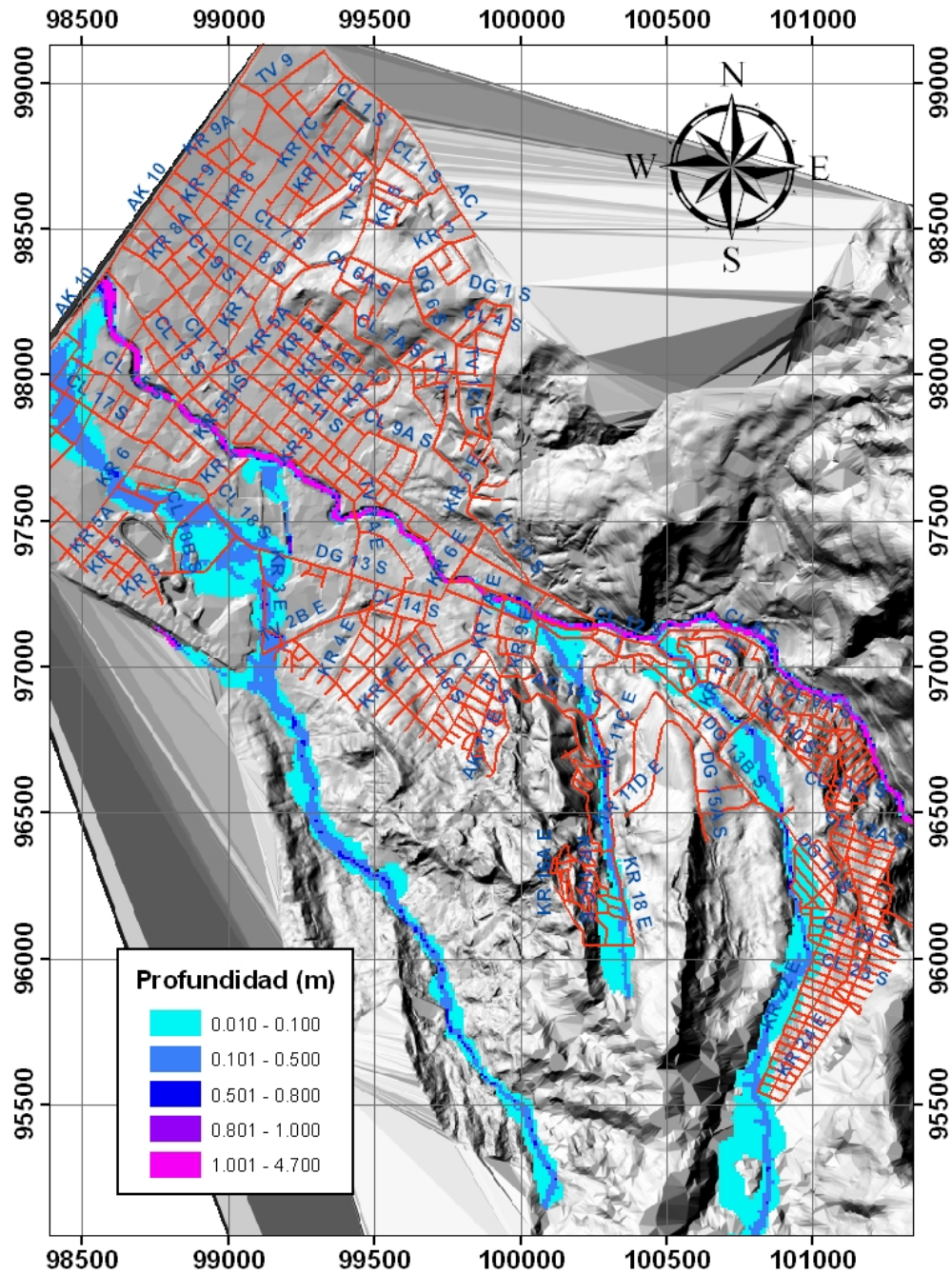


Figura 7-78. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=25$ años)

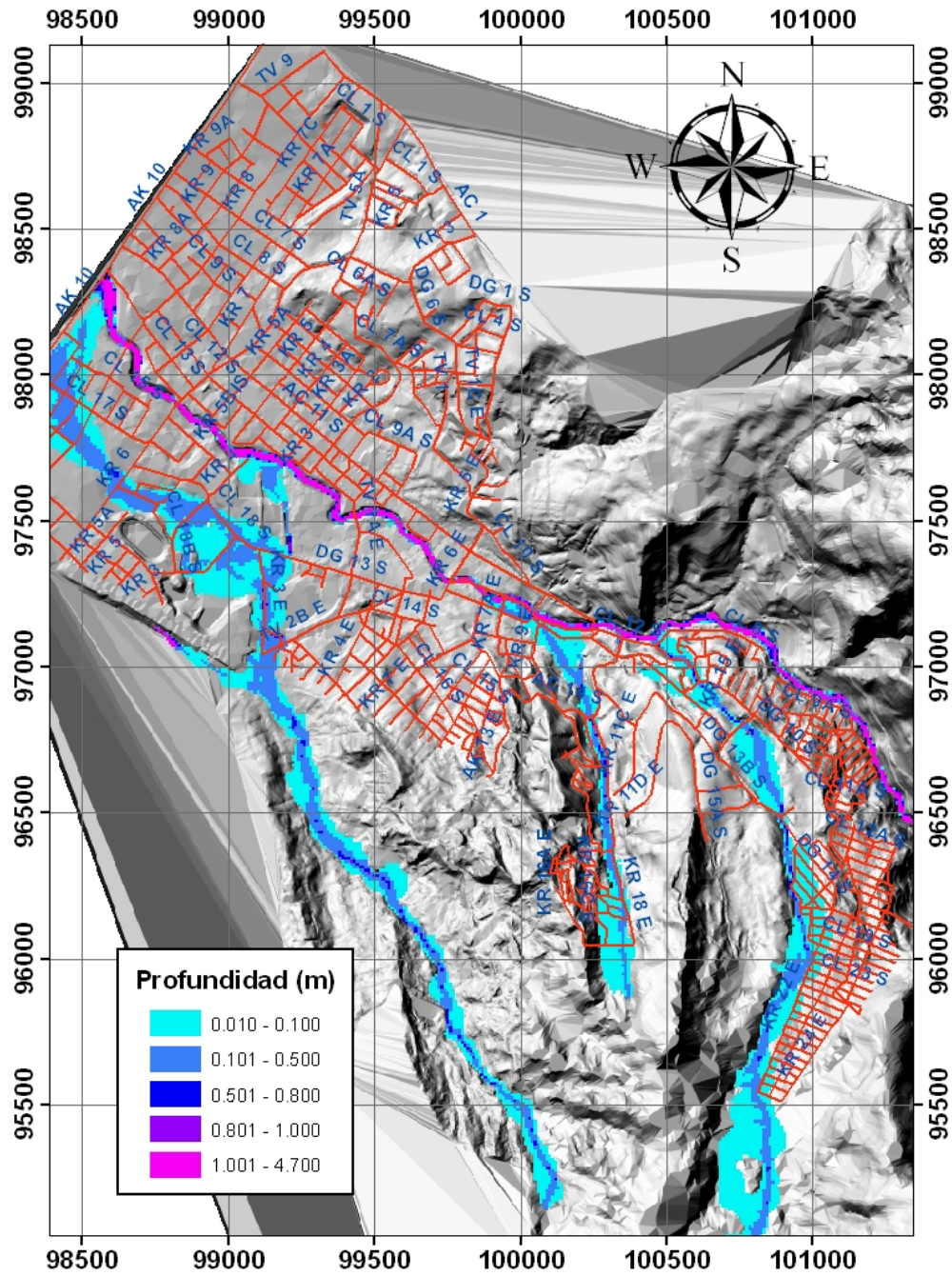


Figura 7-79. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=50$ años)

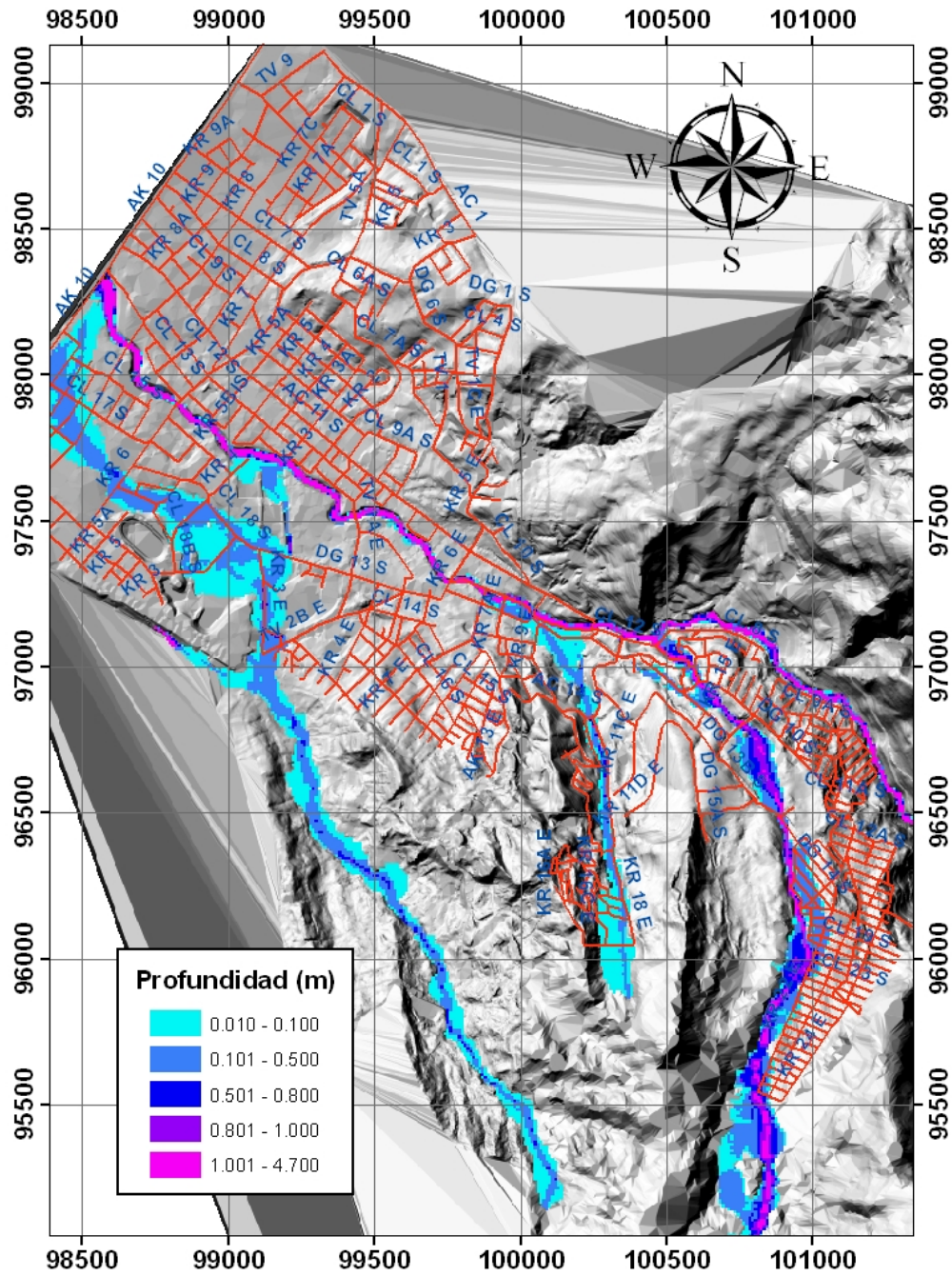


Figura 7-80. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=100$ años)

La quebrada Ramajal, que se simuló asumiendo que existía una obstrucción en la alcantarilla por la cual es entubada hasta llegar al canal San Blas, presenta un desborde considerable para los diferentes periodos de retorno, con profundidades bajas pero que afectan un área considerable en la zona urbana baja de la cuenca.

7.7.6 Escenario II

A diferencia del escenario anterior, en éste, se considerará el flujo de agua con sedimentos producidos por erosión en el área de la cuenca. Dichos volúmenes fueron estimados empleando la fórmula de pérdida universal de suelo – USLE.

Hidrogramas de caudal empleados para la simulación

Los hidrogramas de caudal empleados para esta simulación nuevamente corresponden a los obtenidos en los análisis hidrológicos, para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, incluyendo el volumen aportado por la intrusión de sedimentos en el flujo, y que se representa en una concentración de sólidos constante para el evento. Dichos hidrogramas, se anexan a este informe, y a manera de ilustración, se presentan los empleados en algunos de los puntos donde entregan las diferentes subcuencas.

Dado que la concentración cambia de acuerdo al aporte sólido de cada una de las cuencas, en la siguiente figura se presenta el gráfico del hidrograma de caudal líquido junto con el hidrograma de caudal sólido (línea en color verde), del cuál se puede inferir cual es la concentración de sólidos para cada una de las subcuencas, el cual como se puede apreciar allí, es constante a lo largo del tiempo.

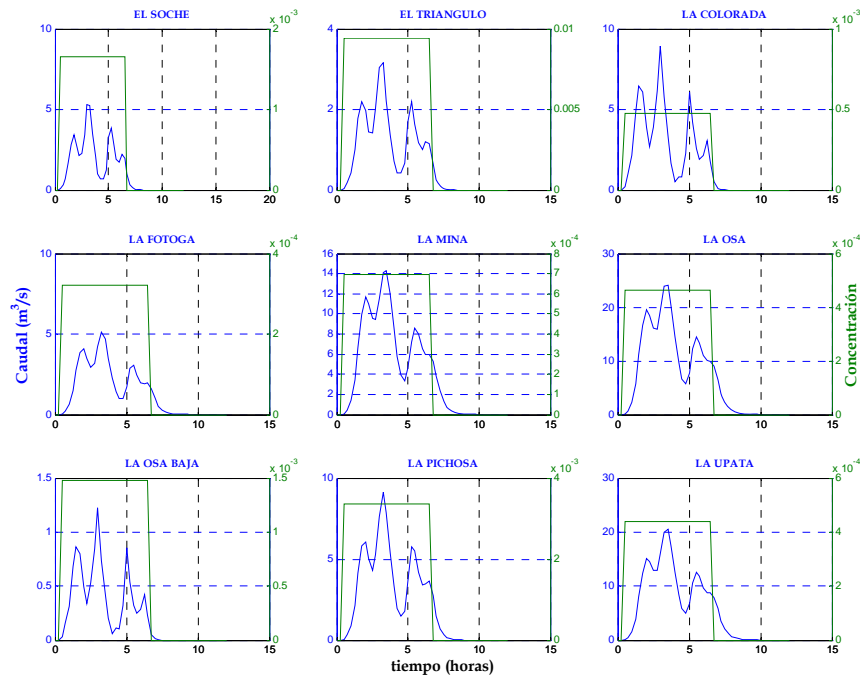


Figura 7-81. Hidrograma de caudal e hidrograma de concentración de sólidos (Periodo de retorno de 100 años para lluvia, y 1000 años para sismo)

Volúmenes de sólidos empleados en la simulación

Los volúmenes producidos por la erosión en la cuenca, fueron estimados empleando la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Estos volúmenes que se emplearán para los escenarios II y III se presentan en la Tabla 7-44.

Subcuenca	Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=70	Tr=90	Tr=100
	Volumen (m ³)						
EL SOCHE	22.14	34.48	51.38	65.94	72.72	79.85	83.56
EL TRIANGULO	76.83	119.64	178.27	228.82	252.33	277.08	289.92
LA COLORADA	9.39	14.62	21.79	27.97	30.85	33.87	35.44
LA FOTOGA	4.64	7.22	10.76	13.81	15.23	16.72	17.50
LA MINA	30.01	46.73	69.63	89.37	98.56	108.23	113.24
LA OSA	33.74	52.53	78.28	100.48	110.80	121.67	127.31
LA OSA BAJA	3.86	6.00	8.95	11.48	12.66	13.90	14.55
LA PICHOSA	80.67	125.62	187.19	240.26	264.95	290.94	304.43
LA UPATA	26.41	41.13	61.29	78.66	86.75	95.26	99.67
LAURELES	21.22	33.05	49.24	63.21	69.70	76.54	80.09
PALO BLANCO ALTA	16.62	25.87	38.55	49.49	54.57	59.92	62.70
PALO BLANCO ALTO DER	8.79	13.68	20.39	26.17	28.85	31.68	33.15

Subcuenca	Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=70	Tr=90	Tr=100
	Volumen (m ³)						
PALO BLANCO MEDIO	26.35	41.04	61.15	78.49	86.55	95.04	99.45
PB-1	4.44	6.92	10.30	13.23	14.59	16.02	16.76
PB-3	12.36	19.25	28.69	36.82	40.60	44.59	46.65
PB-4	90.86	141.49	210.84	270.62	298.42	327.69	342.88
PB-4-2	3.74	5.83	8.68	11.14	12.29	13.49	14.12
PIEDRA REDONDA	10.13	15.77	23.50	30.17	33.27	36.53	38.23
RAMAJAL	66.33	103.28	153.90	197.54	217.84	239.20	250.29
SAN CRISTOBAL	84.11	130.98	195.18	250.51	276.25	303.35	317.41

Tabla 7-44. Volúmenes calculados por erosión en la cuenca

Es importante anotar, que estos volúmenes se distribuyeron uniformes en el tiempo, es decir el caudal sólido, corresponde a dicho volumen distribuido en 6 horas, que es la duración de la lluvia para la cual se obtuvieron los hidrogramas de caudal.

Resultados de las simulaciones para el Escenario II

Se realizaron varias simulaciones que corresponden al escenario de modelación II el cual incluye el volumen de sólidos estimado del análisis hidrológico, y además los sedimentos producidos por erosión en la superficie de la cuenca; estos aportes sólidos, se cuantificaron empleando, como ya se mencionó, la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Los resultados se presentan a continuación.

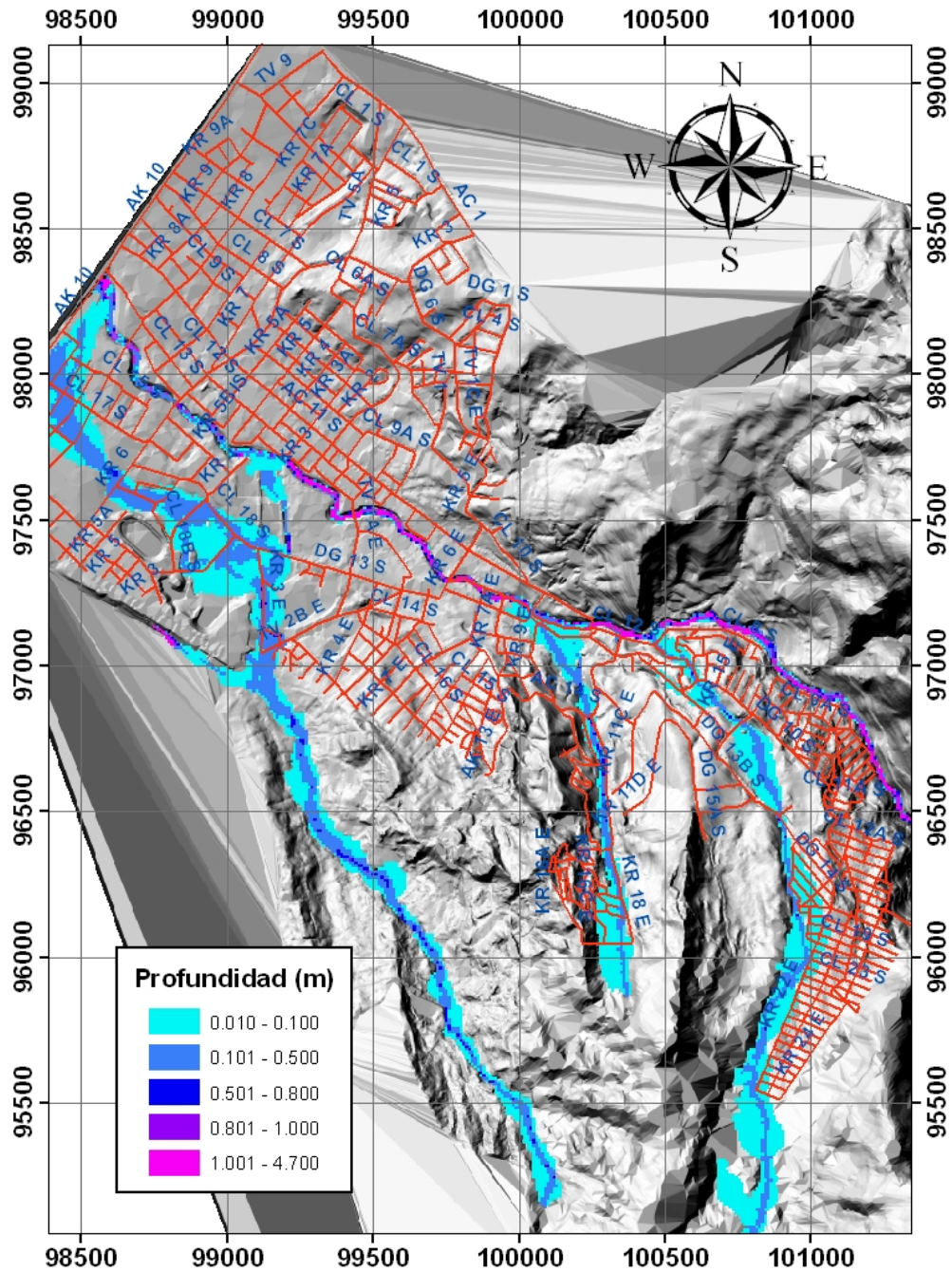


Figura 7-82. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=5$ años) empleando los sedimentos estimados con la ecuación USLE

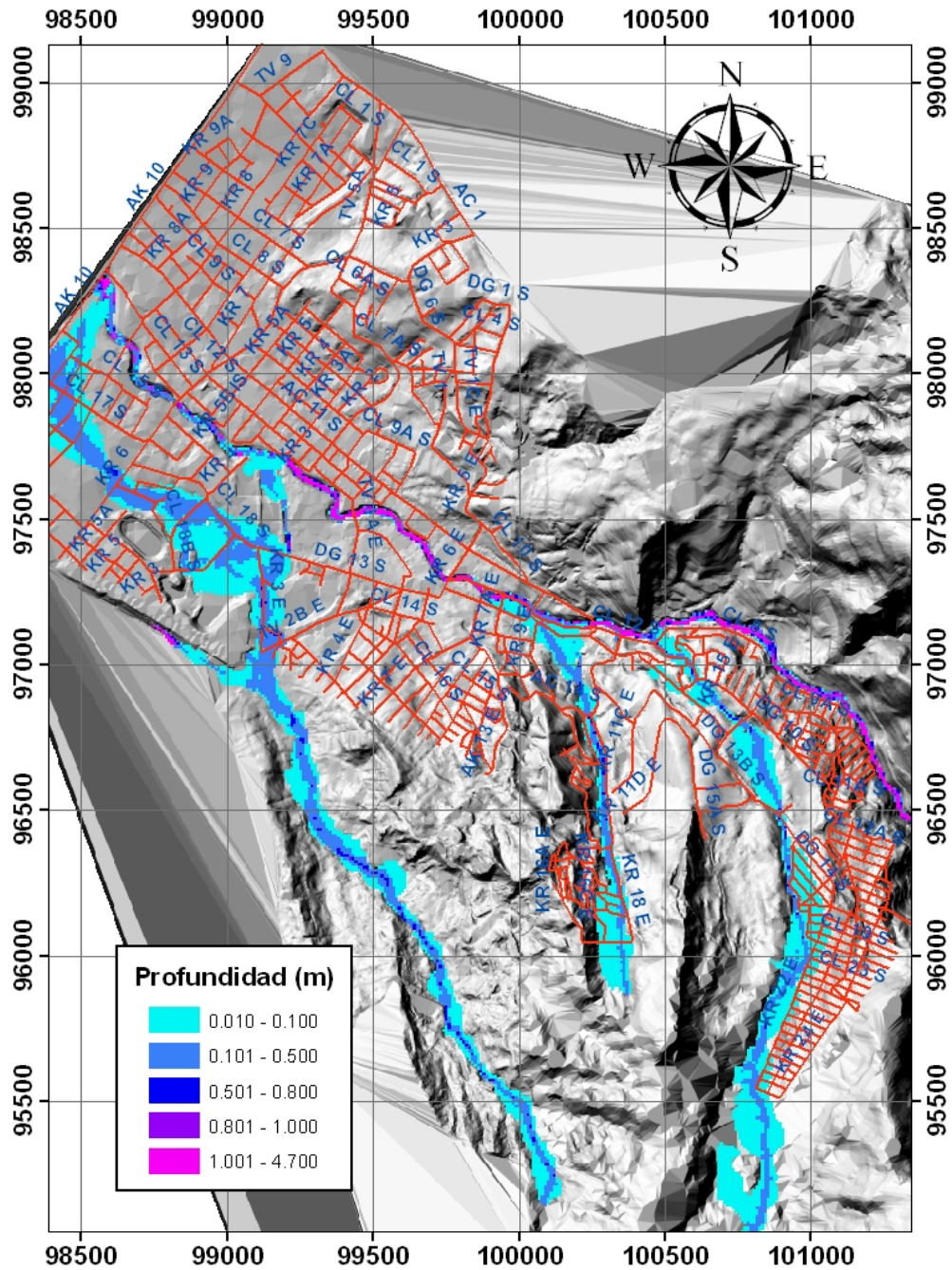


Figura 7-83. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=10$ años) empleando los sedimentos estimados con la ecuación USLE

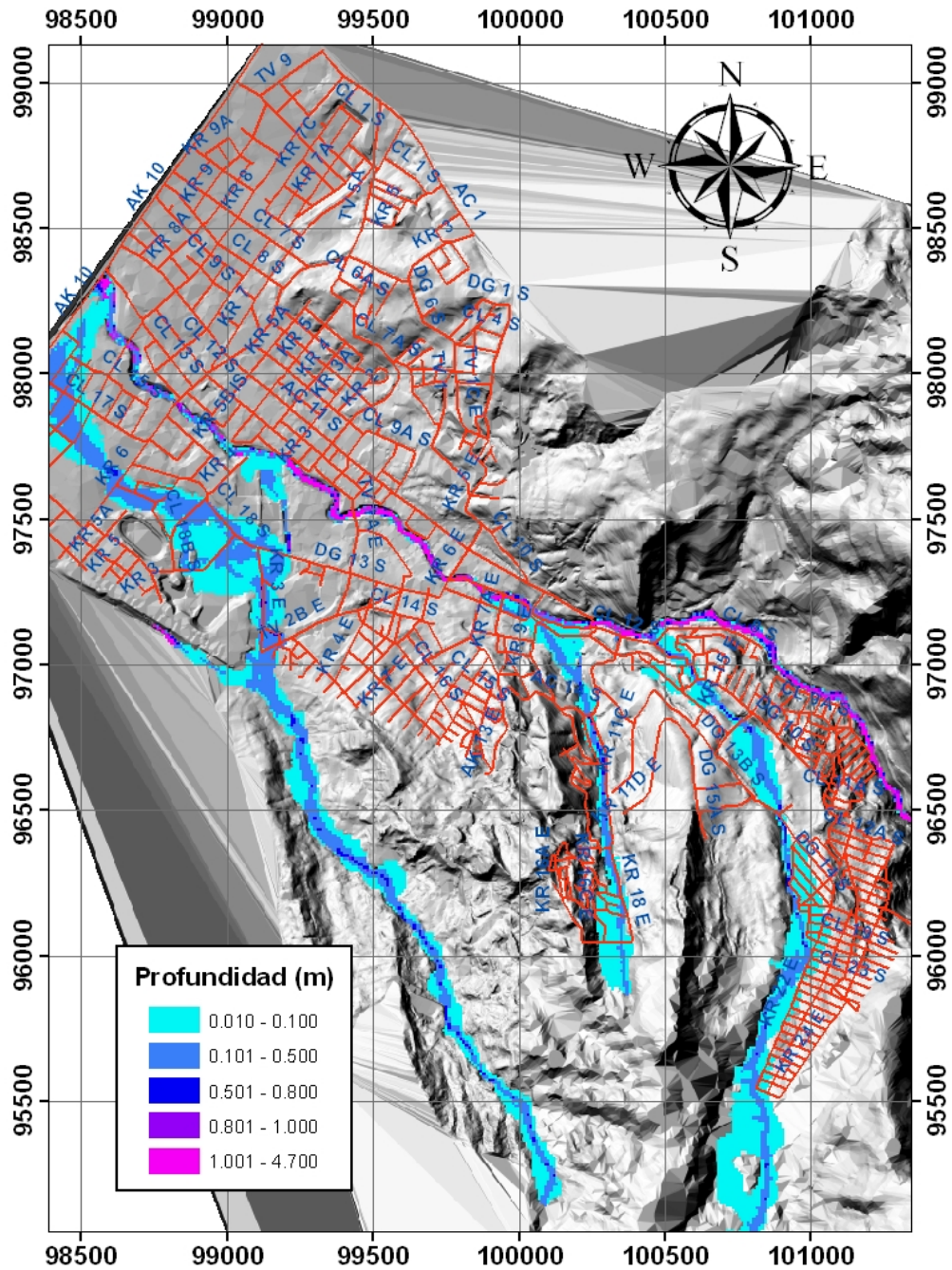


Figura 7-84. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=25$ años) empleando los sedimentos estimados con la ecuación USLE

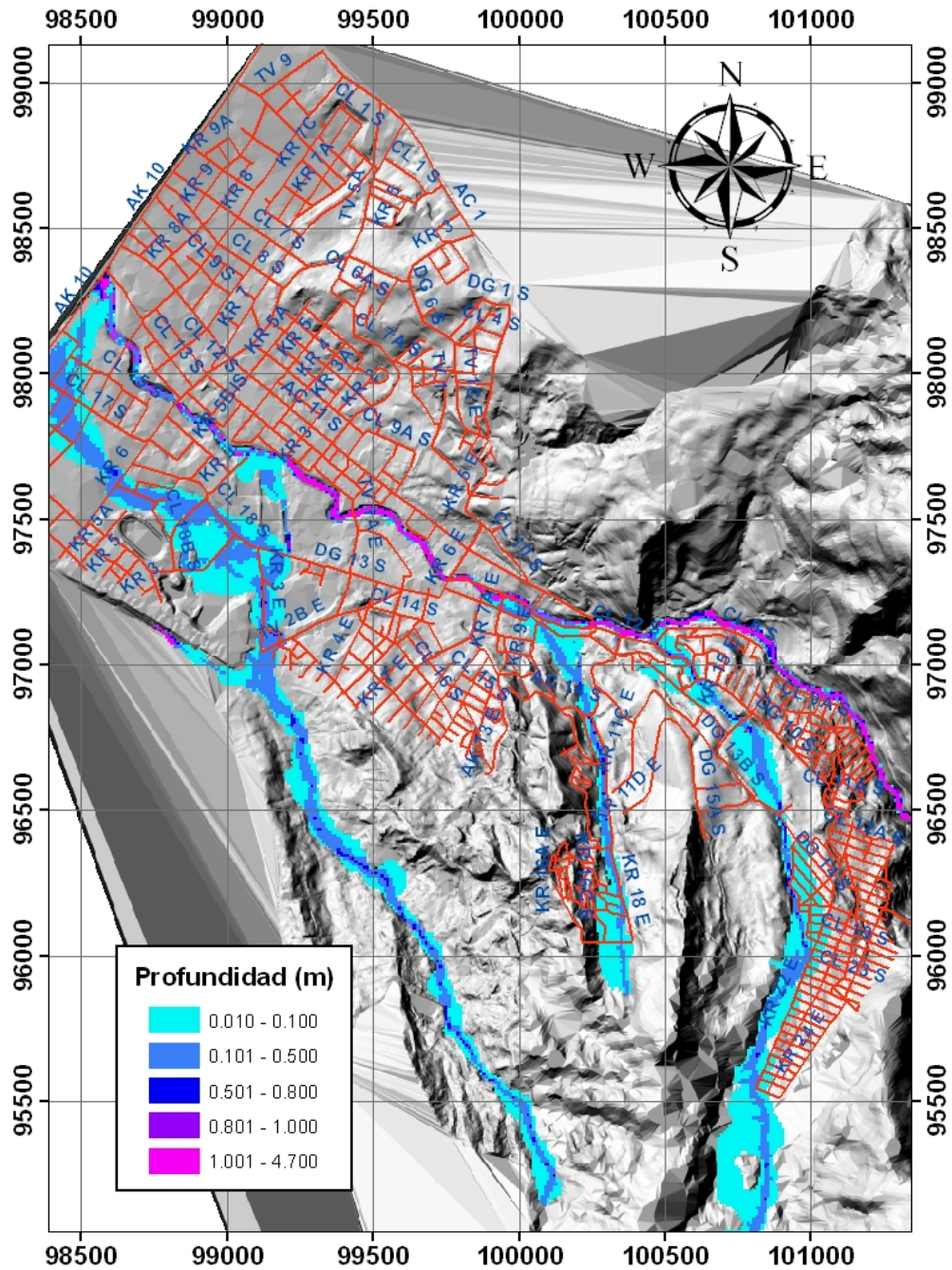


Figura 7-85. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=50$ años) empleando los sedimentos estimados con la ecuación USLE

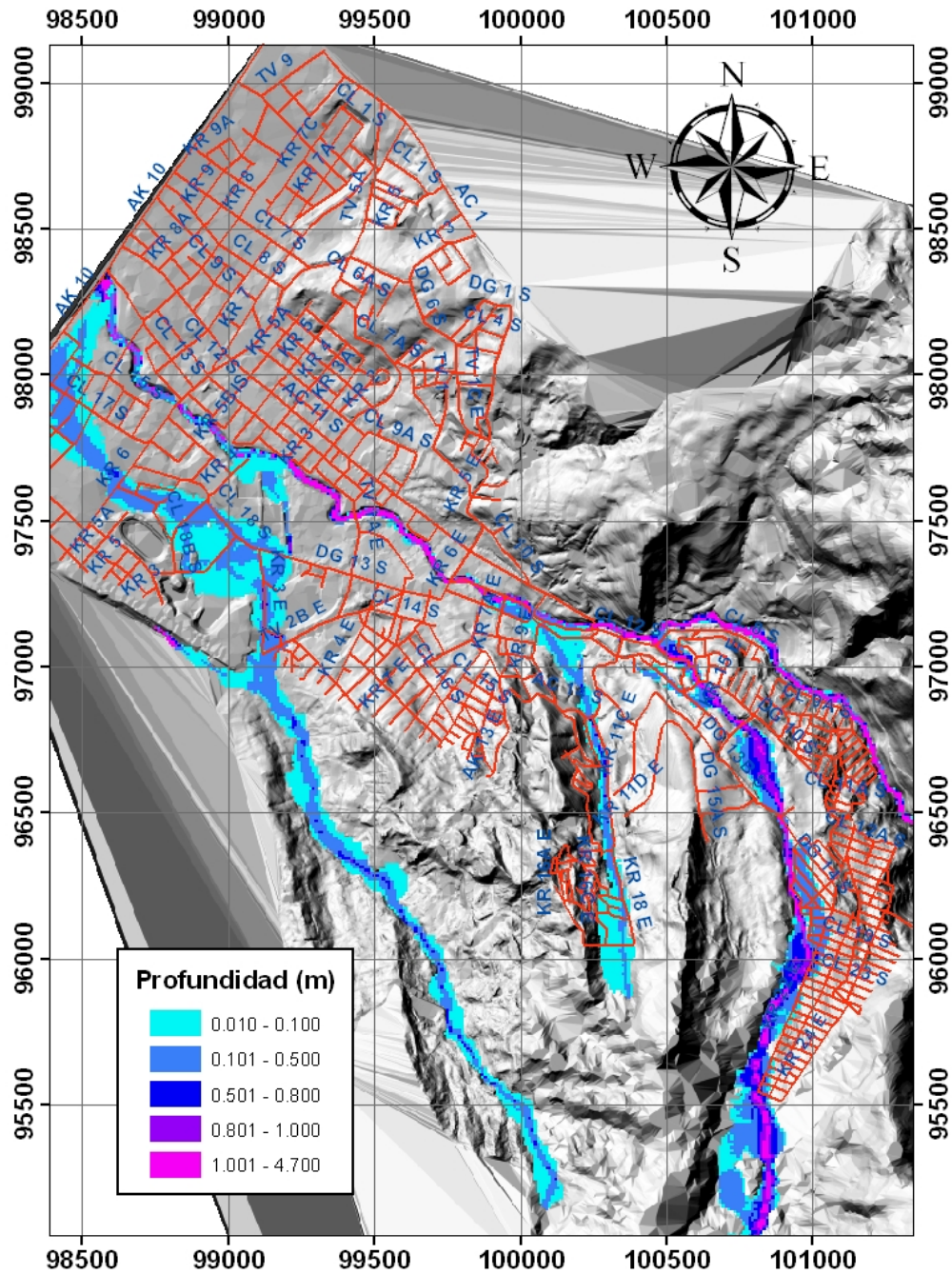


Figura 7-86. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=100$ años) empleando los sedimentos estimados con la ecuación USLE

En términos generales, las manchas de inundación incluyendo los sedimentos producidos por erosión en la cuenca, son similares a las producidas por sólo agua, esto, debido a que el aporte sólido es muy pequeño en comparación con el aporte líquido, haciendo que las concentraciones de sólidos sean pequeñas y el flujo simplemente se comporte como un flujo bajo condiciones normales de arrastre de sedimentos.

Bajo estas características, el flujo en el cauce del río San Cristóbal sigue permaneciendo confinado sin presentar desborde que causen gran afectación. Para esta simulación, la máxima profundidad presentada en el cauce es de 4.64 m, con un valor medio de 1.1 m en la condición extrema de periodo de retorno de 100 años. De igual forma, para este escenario, las velocidades se encuentran en un rango entre 1 y 12 m/s.

7.7.7 Escenario III

Se considera el flujo de agua con sedimentos producidos por la falla de los taludes del cauce (inestabilidad en las bancas), junto con los volúmenes de los escenarios anteriores, es decir, con el aporte producido por erosión en el área de la cuenca. Es importante anotar que para este escenario sólo se simuló el comportamiento del flujo en el cauce del río y sin incluir los parámetros que relacionan el esfuerzo de cedencia y la viscosidad del flujo con la concentración de sólidos en proporción del volumen total, esto, dado que la concentración máxima, como se indica más adelante es muy baja.

Hidrogramas de caudal empleados para la simulación

En la siguiente figura se presentan los hidrogramas de caudal y de concentración de sólidos, que se emplearon para este escenario. La figura muestra los hidrogramas de las diferentes subcuencas para un periodo de retorno de 100 años de lluvia, con un sismo de periodo de recurrencia de 1000 años. Los demás hidrogramas, se presentan en el Anexo D-6.

Nuevamente, se asumió que la concentración de sólidos es constante, con un valor máximo de 0.24 para en los hidrogramas de periodo de retorno de 5 años. Para el periodo de retorno de 100 años, la concentración de sólidos fue de 0.13, lo que demuestra que para eventos extremos de lluvia que generen caudales altos, el flujo diluye los sólidos, generando un flujo normal de agua con una cierta carga de sedimentos.

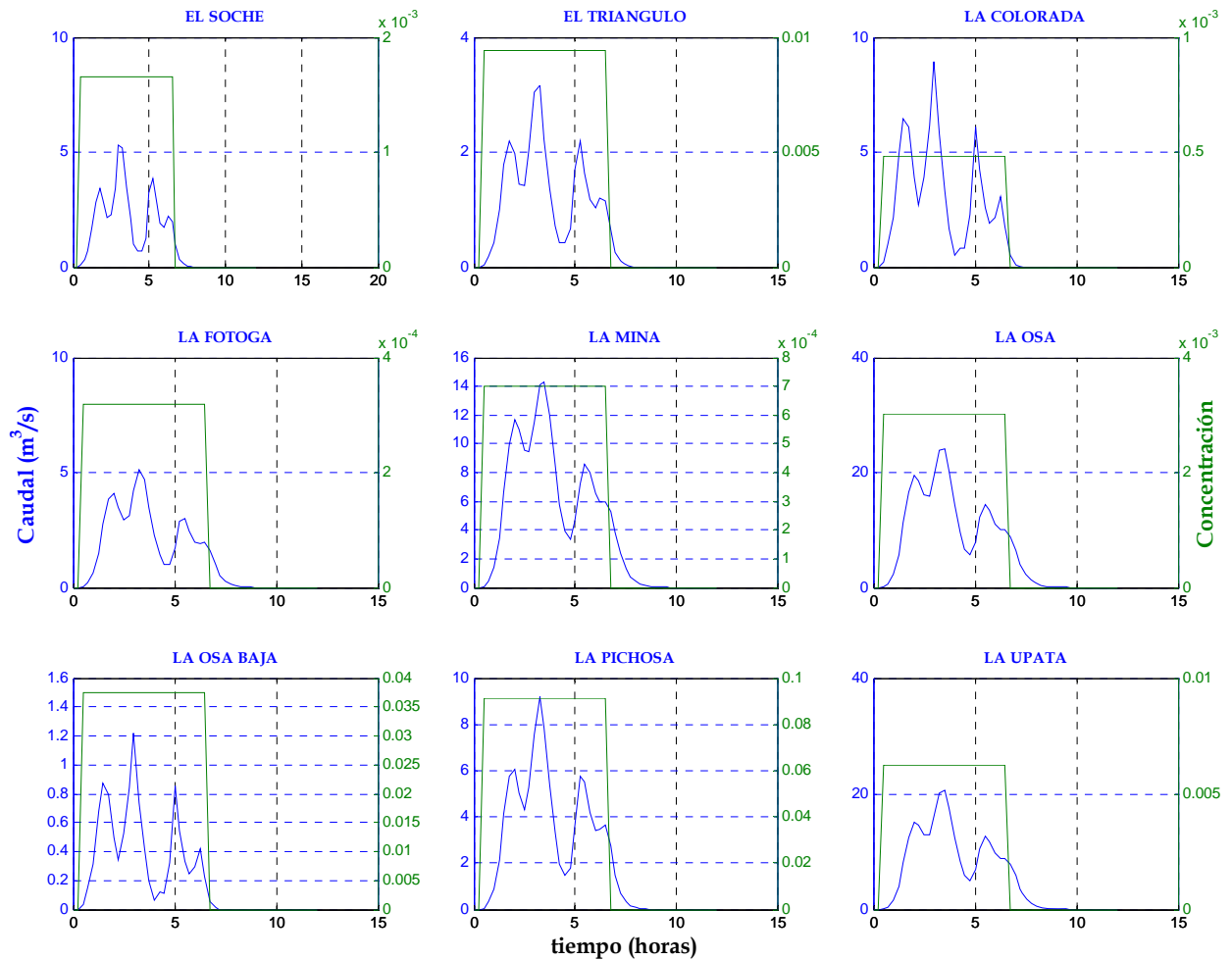


Figura 7-87. Hidrograma de caudal e hidrograma de concentración de sólidos (Periodo de retorno de 100 años para lluvia, y 1000 años para sismo)

Volúmenes de sólidos empleados en la simulación

Los volúmenes de sólidos que se emplearon en este escenario, se presentan a continuación. Es de anotar, que los volúmenes del escenario anterior se suman a los presentados en la tabla.

Periodo de retorno de sismo (años)	Sitio Puntual	Volúmenes para diferentes Periodo de retorno de lluvia (m3)						
		5	10	25	50	70	90	100
0-10	Colorada	0	0	0	0	0	0	0
	Osa	76	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2
	Pichosa	7687	7687	7687	7687	7687	7687	7687
	Ramajal	1588 8	1588 8	1588 8	1588 8	1588 8	1588 8	1588 8
50	Colorada	0	0	0	0	0	0	0
	Osa	76	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2
	Pichosa	7687	7687	7687	7687	7687	7687	7687
	Ramajal	1118 8	1118 8	1118 8	1118 8	1118 8	1118 8	1118 8
100	Colorada	293	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5
	Osa	76	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2
	Pichosa	7687	7687	7687	7687	7687	7687	7687
	Ramajal	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0
500-1000	Colorada	293	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5	292.5
	Osa	8291	8291	8291	8291	8291	8291	8291
	Pichosa	7687	7687	7687	7687	7687	7687	7687
	Ramajal	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0	1672 0

Tabla 7-45. Volúmenes para diferentes periodos de retorno para el Escenario III

Para estas simulaciones, y en relación con el volumen de sólidos, se analizaron cuatro tramos para los cuales se presentó un aporte de sólidos correspondiente a la falla de la banca en dichos tramos del cauce.

Resultados de las simulaciones para el Escenario III

Las simulaciones se realizaron para diferentes periodos de retorno de un sismo: 10, 50, 100, 475 y 1000 años. A continuación se presentan los resultados para el escenario de 1000 años de periodo de retorno de sismo, situación más crítica en los análisis.

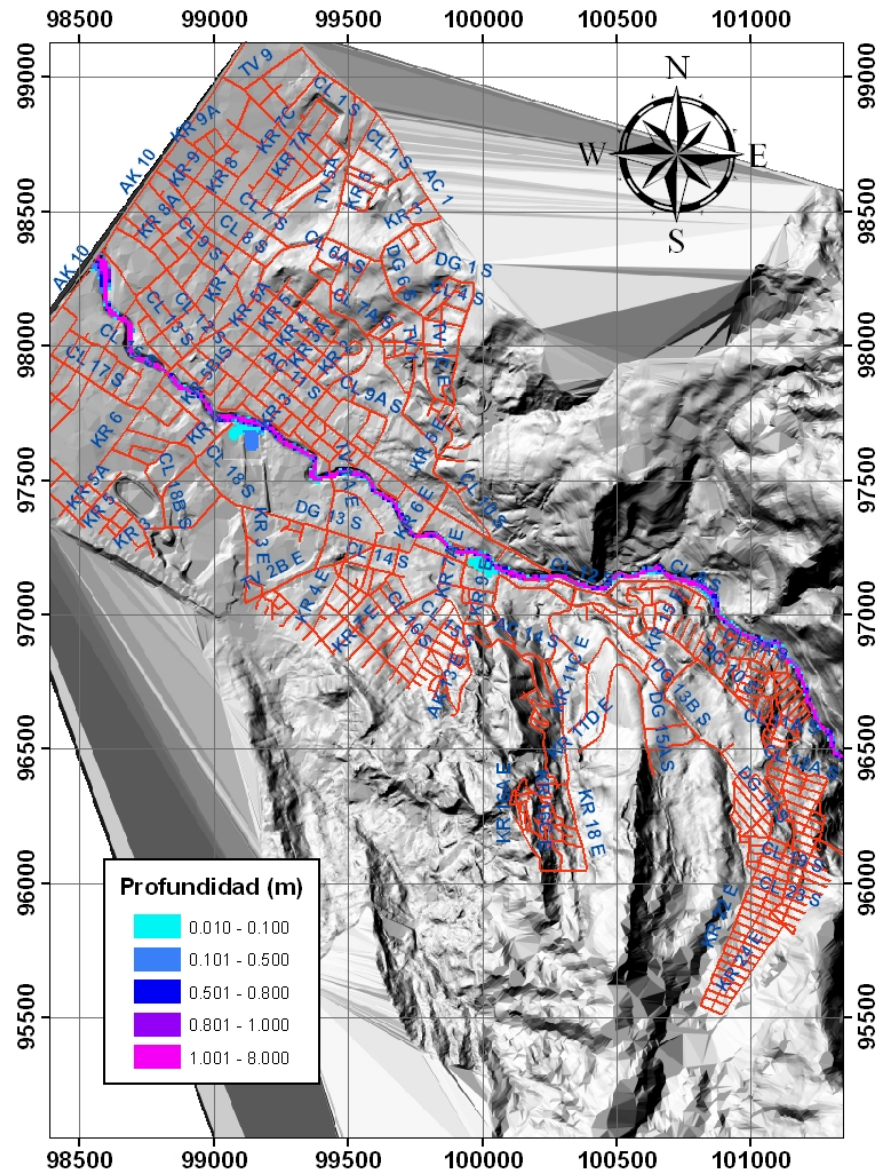


Figura 7-88. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D (Tr=5 años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario III

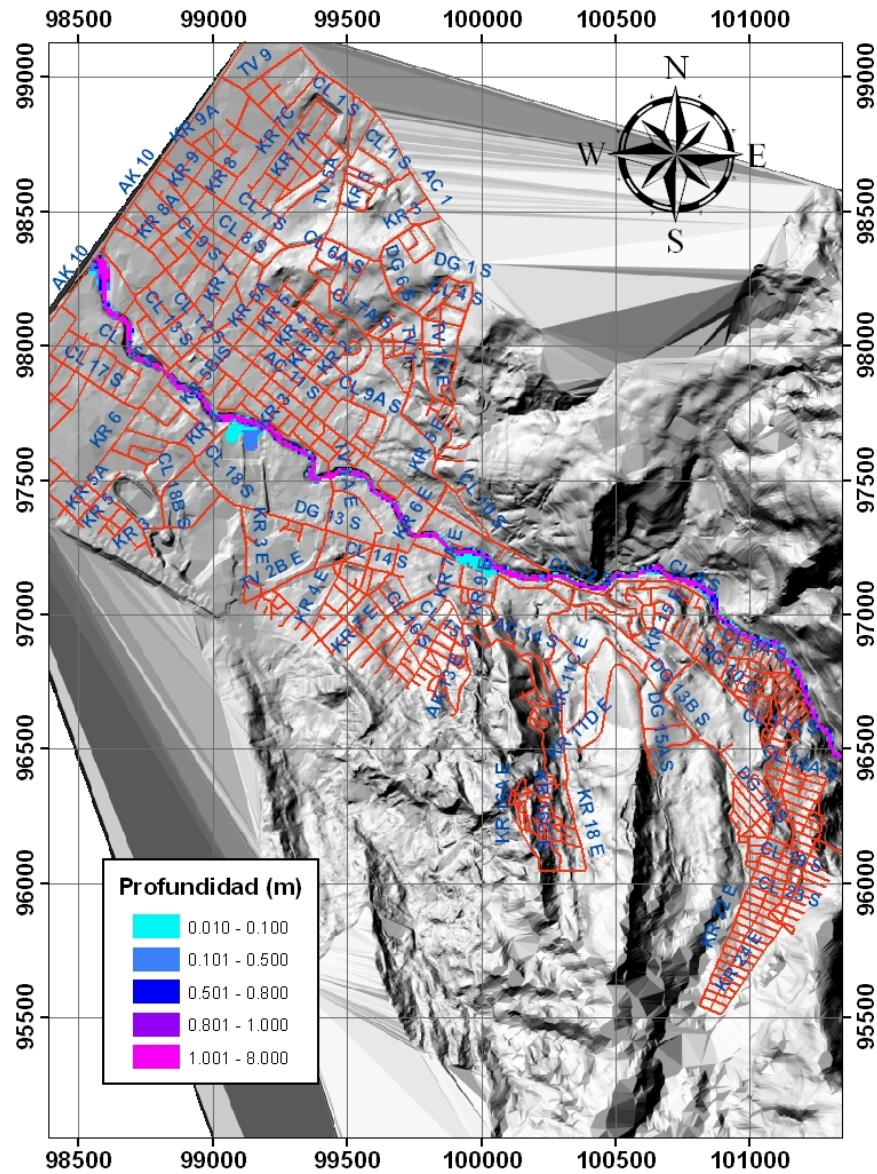


Figura 7-89. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=10$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario III

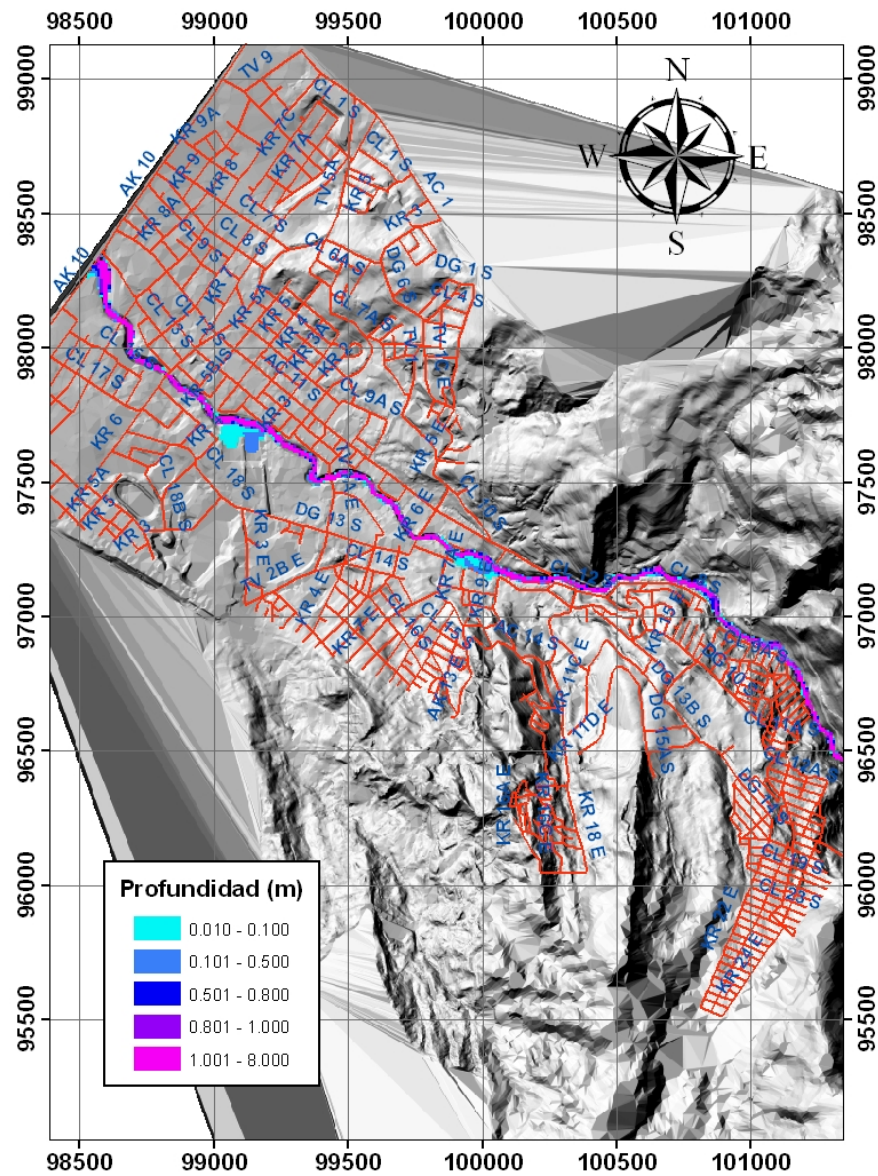


Figura 7-90. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=25$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario III

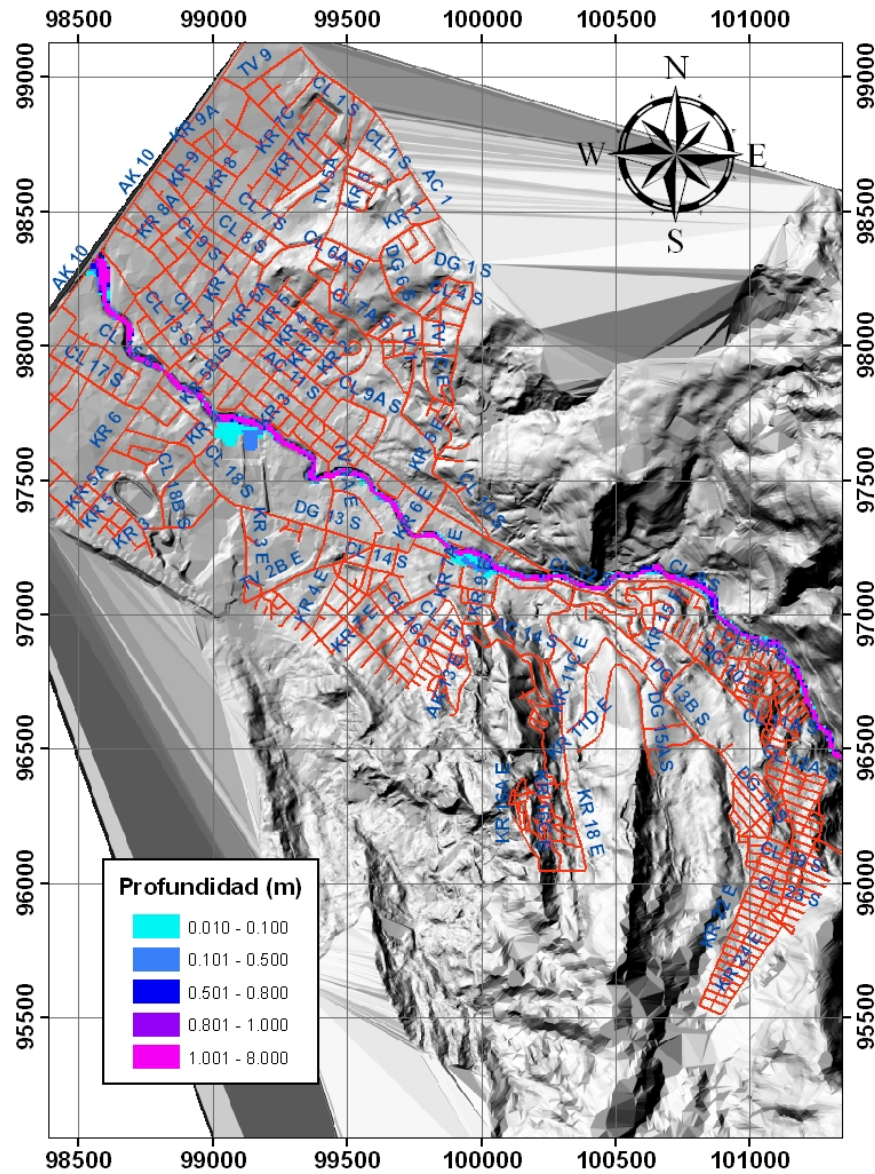


Figura 7-91. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=50$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario III

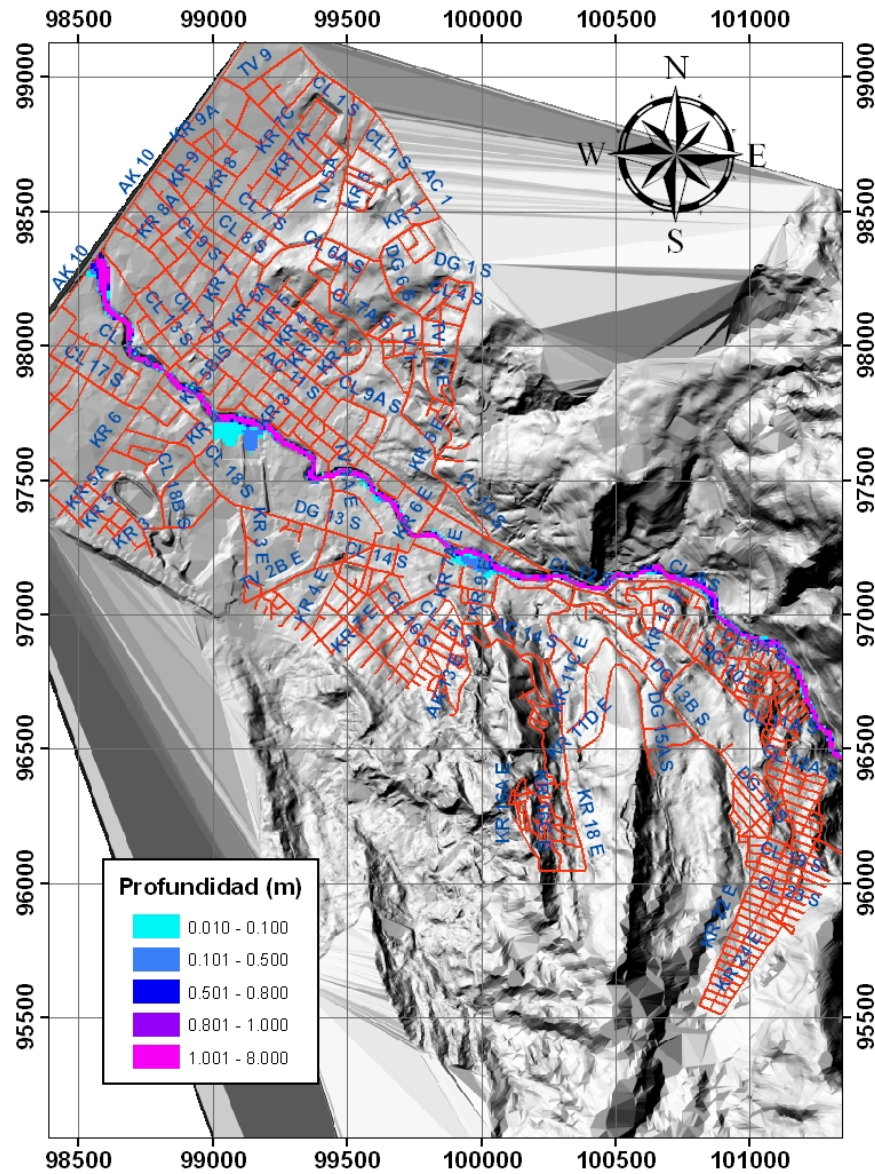


Figura 7-92. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=100$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario III

7.7.8 ESCENARIO IV

En este escenario se considera el flujo de agua con un aporte de sedimentos producidos por deslizamientos en las laderas, es decir, con los aportes de material generados por los deslizamientos. Para este caso, el flujo también recibe el aporte de material por erosión en la cuenca (volúmenes del escenario II), e igual también el material aportado por la falla en la banca en diferentes sitios del cauce.

Hidrogramas de caudal empleados para la simulación

Para este escenario, en la siguiente figura se presentan los hidrogramas de caudal y de concentración de sólidos. La figura aquí nuevamente muestra los hidrogramas de las diferentes subcuencas para un periodo de retorno de 100 años de lluvia, con un sismo de periodo de recurrencia de 1000 años (en el Anexo D-6 se presentan los demás hidrogramas).

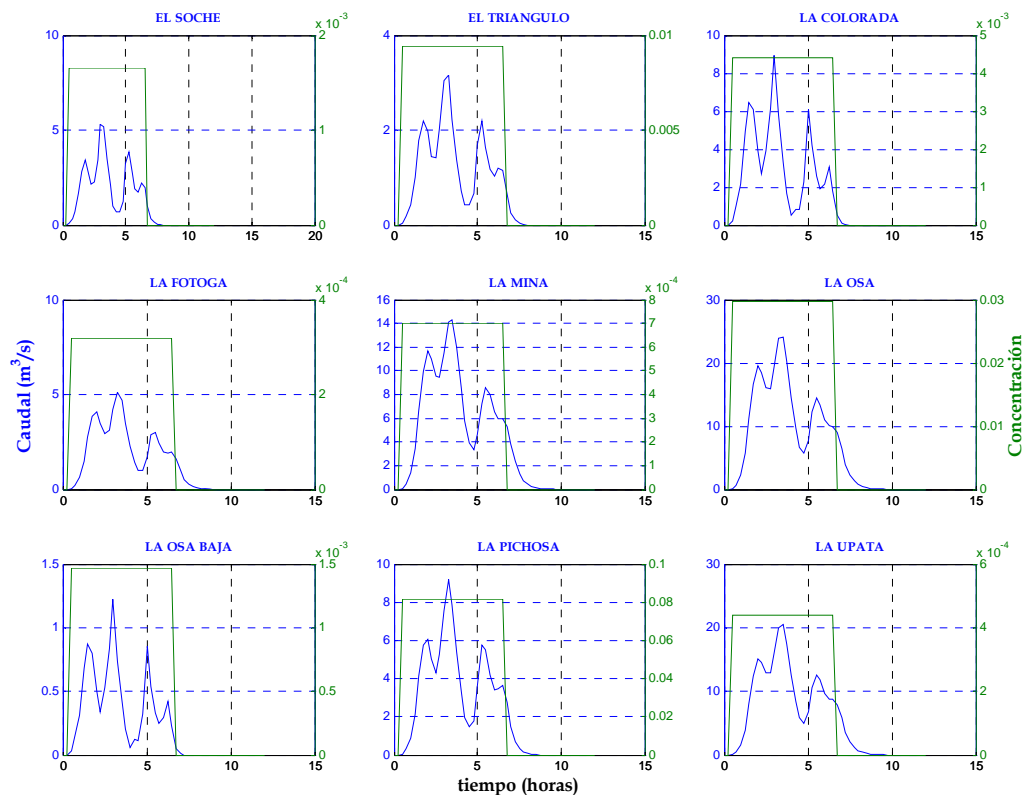


Figura 7-93. *Hidrograma de caudal e hidrograma de concentración de sólidos (Periodo de retorno de 100 años para lluvia, y 1000 años para sismo)*

Para este escenario, la concentración máxima empleada en los hidrogramas no superó los 0.24, que se presentó por el periodo de retorno de 5 años. Para 10 años, la concentración máxima fue de 0.20, y para 25, 50 y 100 años, fueron de 0.16, 0.14 y 0.13 respectivamente. De acuerdo con la clasificación presentada en los manuales del programa FLO-2D, el flujo se comporta como un flujo normal de agua con una cierta cantidad de sedimentos sin llegar a ser un flujo de lodos o un flujo hiperconcentrado.

Volúmenes de sólidos empleados en la simulación

Subcuenca	Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=70	Tr=90	Tr=100
	Volumen (m ³)						
EL SOCHE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EL TRIANGULO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA COLORADA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA FOTOGA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA MINA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA OSA	0.00	0.00	121.49	395.00	570.12	627.37	627.37
LA OSA BAJA	0.00	0.00	109.42	248.50	366.54	370.04	370.04
LA PICHOSA	0.00	47.03	620.06	855.99	865.91	945.13	1030.39
LA UPATA	0.00	0.00	373.72	881.07	1205.15	1255.17	1255.17
LAURELES	0.00	0.00	290.95	646.61	981.06	1044.29	1044.29
PALO BLANCO ALTA	0.00	3.93	39.28	39.28	39.28	39.71	39.28
PALO BLANCO ALTO DER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PALO BLANCO MEDIO	0.00	53.91	720.56	753.58	796.35	796.35	796.35
PB-1	0.00	8.49	84.88	84.88	84.88	84.88	84.88
PB-3	0.00	45.10	675.91	675.91	675.91	675.91	675.91
PB-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB-4-2	0.00	6.94	69.41	69.41	69.41	69.41	69.41
PIEDRA REDONDA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RAMAJAL	0.00	2.74	40.54	48.65	58.52	60.96	63.40
SAN CRISTOBAL	0.00	221.35	2801.35	3674.37	4112.91	4255.34	4662.42

Tabla 7-46. Volúmenes producidos por deslizamientos

Estos volúmenes de sólidos producidos por deslizamientos, se suman a los volúmenes que se presentaron en los escenarios anteriores, siendo este el escenario más crítico para las simulaciones.

Resultados de las simulaciones para el Escenario IV

Es importante también resaltar que estos análisis se realizaron para diferentes periodos de retorno de ocurrencia de un sismo (10, 50, 100, 475 y 1000 años de periodo de retorno). En las siguientes figuras se muestran los resultados para los escenarios más críticos de sismo, es decir, para los 1000 años de periodo de retorno.

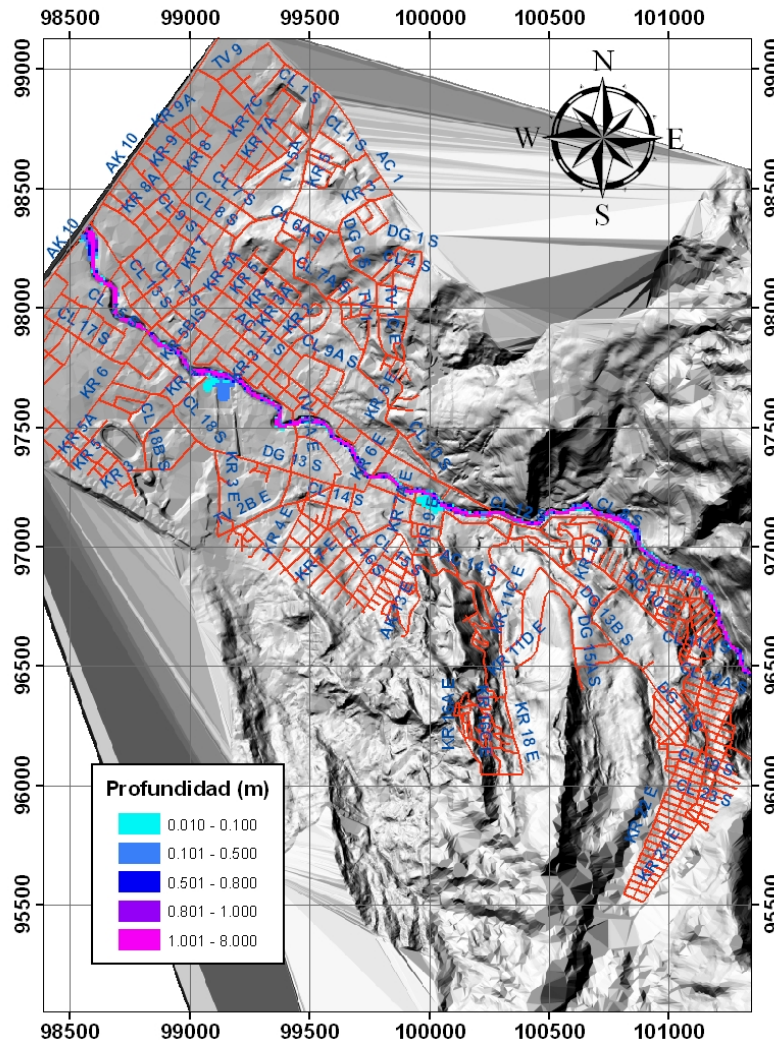


Figura 7-94. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D (Tr=5 años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario IV

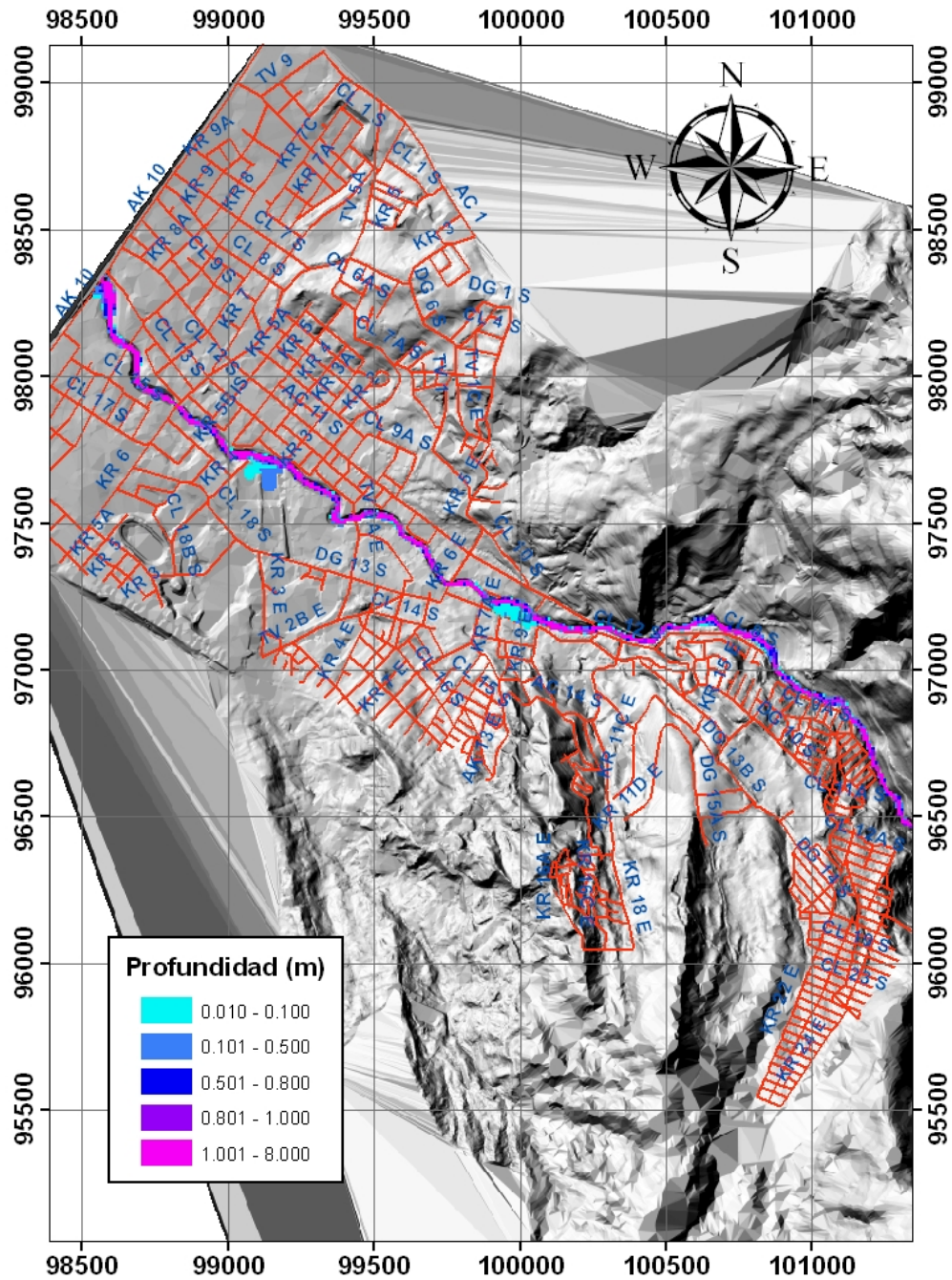


Figura 7-95. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=10$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario IV

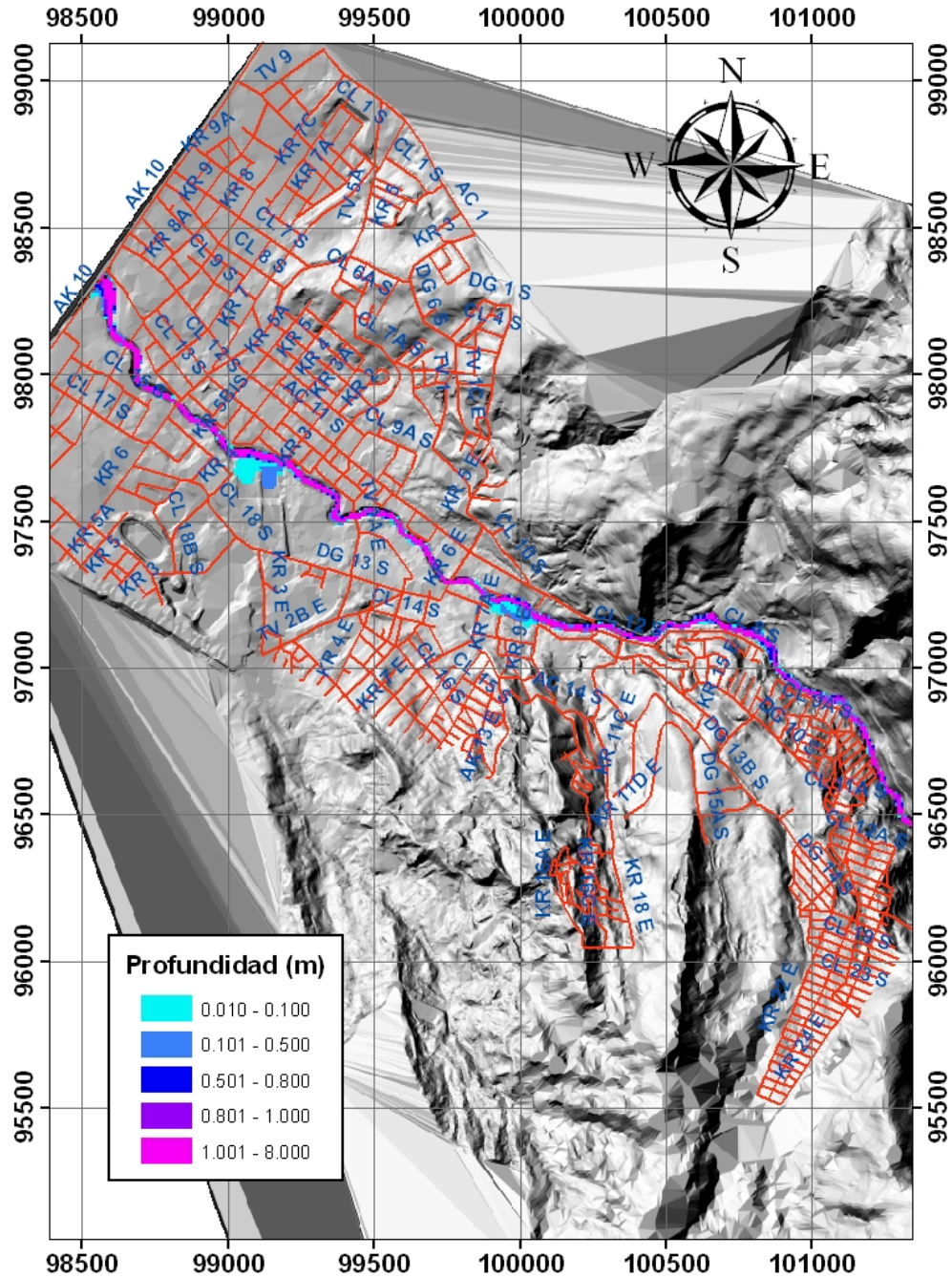


Figura 7-96. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($T_r=25$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario IV

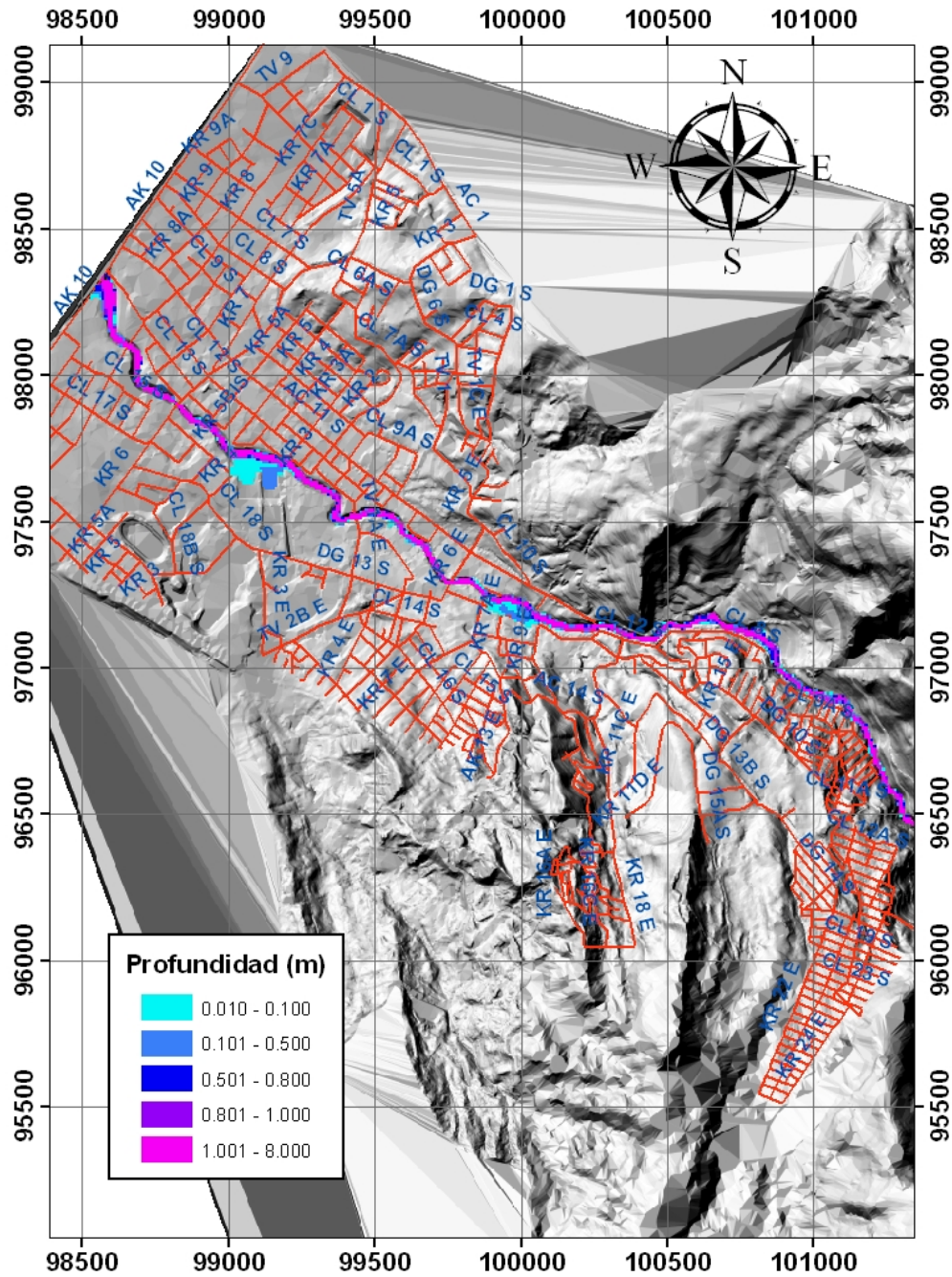


Figura 7-97. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D ($Tr=50$ años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario IV

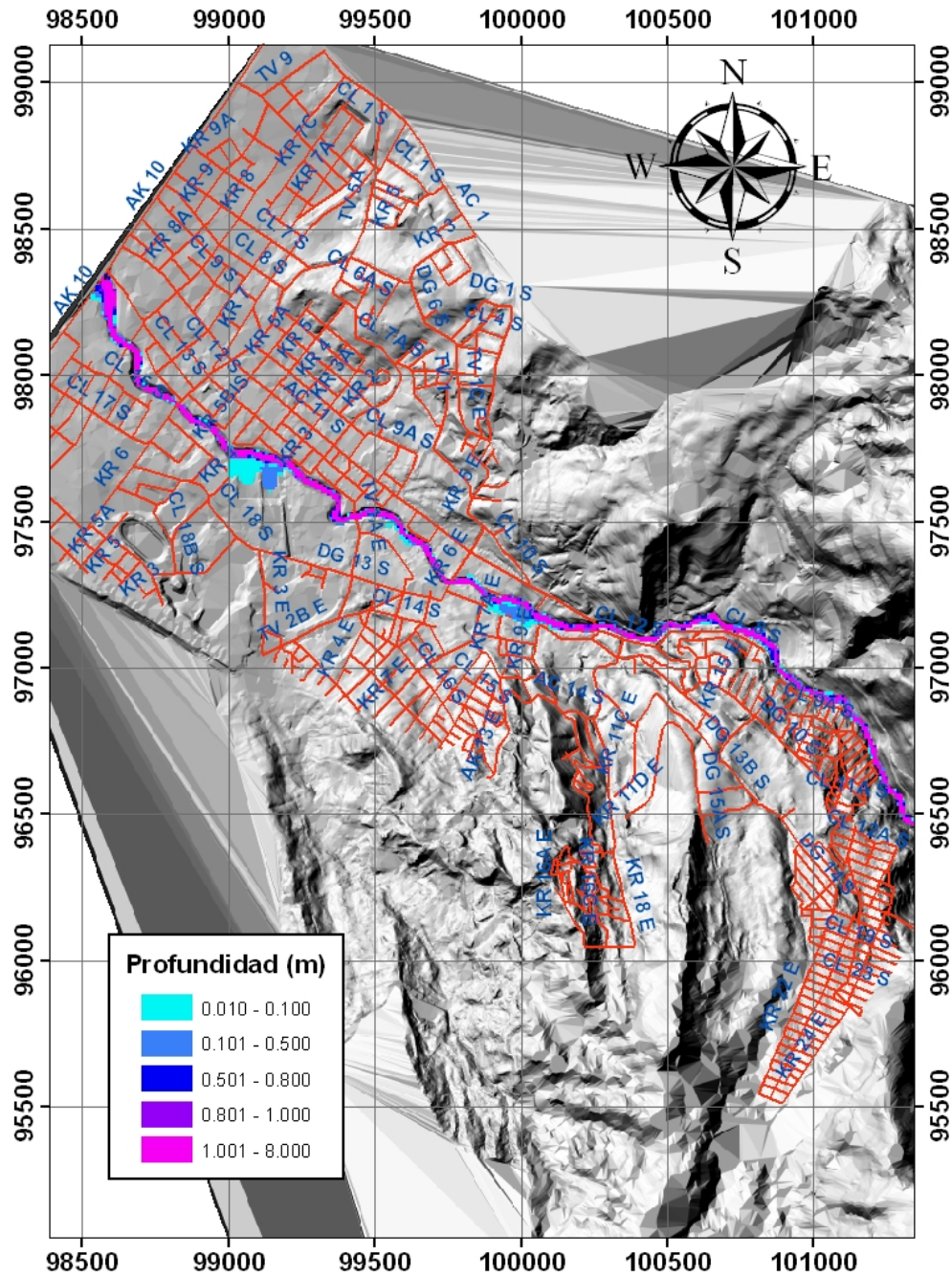


Figura 7-98. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D (Tr=100 años para lluvia, 1000 años para sismo) para el escenario IV

Dadas las características mostradas en las figuras, relacionadas con la profundidad del flujo en el cauce, es posible ver que no existen para el río San Cristóbal, diferencias notables, o zonas de desbordamiento del flujo para estas situaciones que son las más críticas en los análisis dado que presentan el mayor aporte sólido. Se puede ver que en las figuras desde la 7-94 a la 7-98, no hay un cambio sustancial en los resultados, tal vez debido esto al régimen del flujo que se puede presentar en el cauce.

Estas similitudes en los rangos de profundidades fueron reiterativas en todos los escenarios de simulación de flujos.

En términos generales, las simulaciones no presentan variaciones significativas en cuanto a las profundidades alcanzadas por el flujo en el cauce del río San Cristóbal. No existió de acuerdo con los resultados, desbordamientos considerables en las zonas ribereñas a este cauce.

Dado que en las simulaciones de los escenarios anteriores, las concentraciones de sólidos son relativamente bajas, los efectos producidos por la viscosidad en el flujo y en el esfuerzo inicial de cadencia, tiende a ser mínimos en comparación con los efectos de la fricción en el flujo. Esto indica, que análisis con modelos matemáticos que no consideren cambios en la densidad y en la viscosidad pueden ser lo suficientemente aproximados para este cauce.

7.7.9 Escenario V (Alternativa con obras)

Este escenario presenta los resultados de la simulación con obras, para la condición más crítica de las cuatro anteriores, a fin de mitigar la amenaza por flujos torrenciales.

Dado que de acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, la situación más crítica se presenta en las quebradas afluentes al río San Cristóbal, y no propiamente al cauce principal, este análisis se presentó para las quebradas La Pichosa y El Triángulo.

Para estas dos quebradas, la alternativa planteada consistió en la canalización de la quebrada como medida estructural. Esta medida de mitigación consistió en colocar por el cauce de dichas quebradas un canal con una sección que pudiese transportar el flujo generado en la cuenca. Esta estructura se supuso con sección transversal constante y con las características que se presentan para cada una de las quebradas, de acuerdo con la Tabla 7-47. Estas simulaciones se realizaron para las condiciones extremas en cada una de las quebradas, es decir, empleando los hidrogramas de caudal utilizados en el escenario IV.

Quebrada	Tipo de Sección	Ancho (m)	Base (m)	Coefficiente de rugosidad
La Pichosa	Rectangular	2.0	1.5	0.013
El Triangulo	Rectangular	1.5	1.2	0.013

Tabla 7-47. Características de los canales en las quebradas El Triangulo y La Pichosa

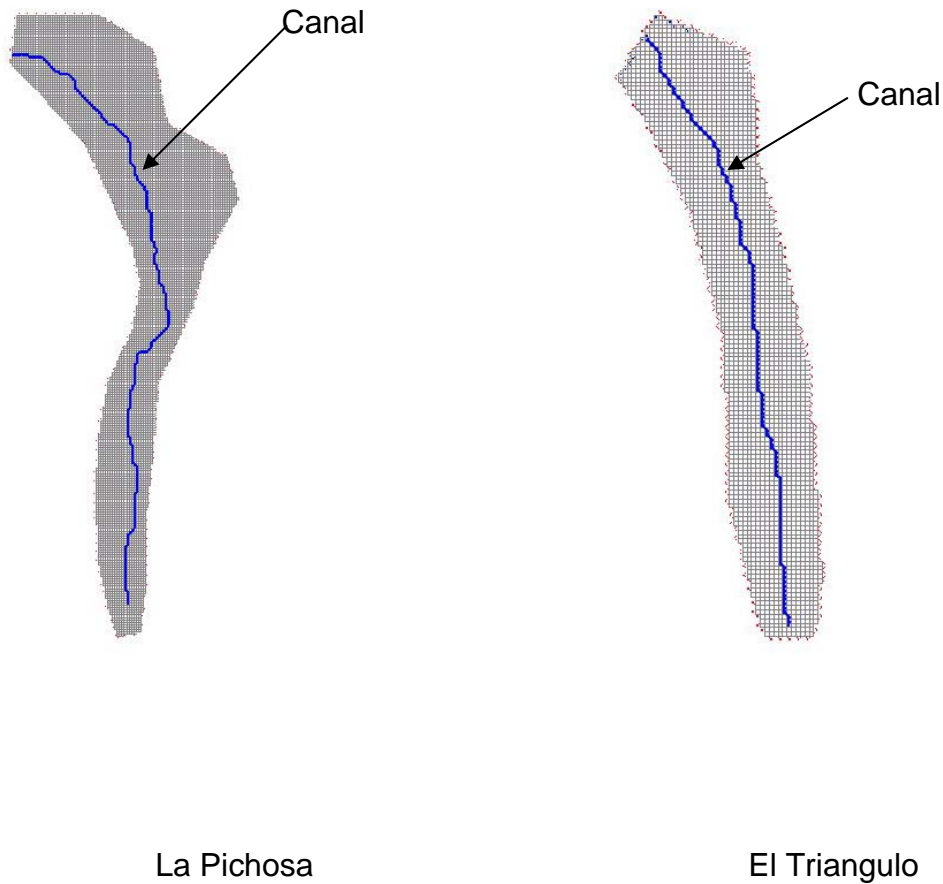


Figura 7-99. Obras para la modelación matemática con FLO-2D para las quebradas La Pichosa y el Triangulo (canal de mitigación)

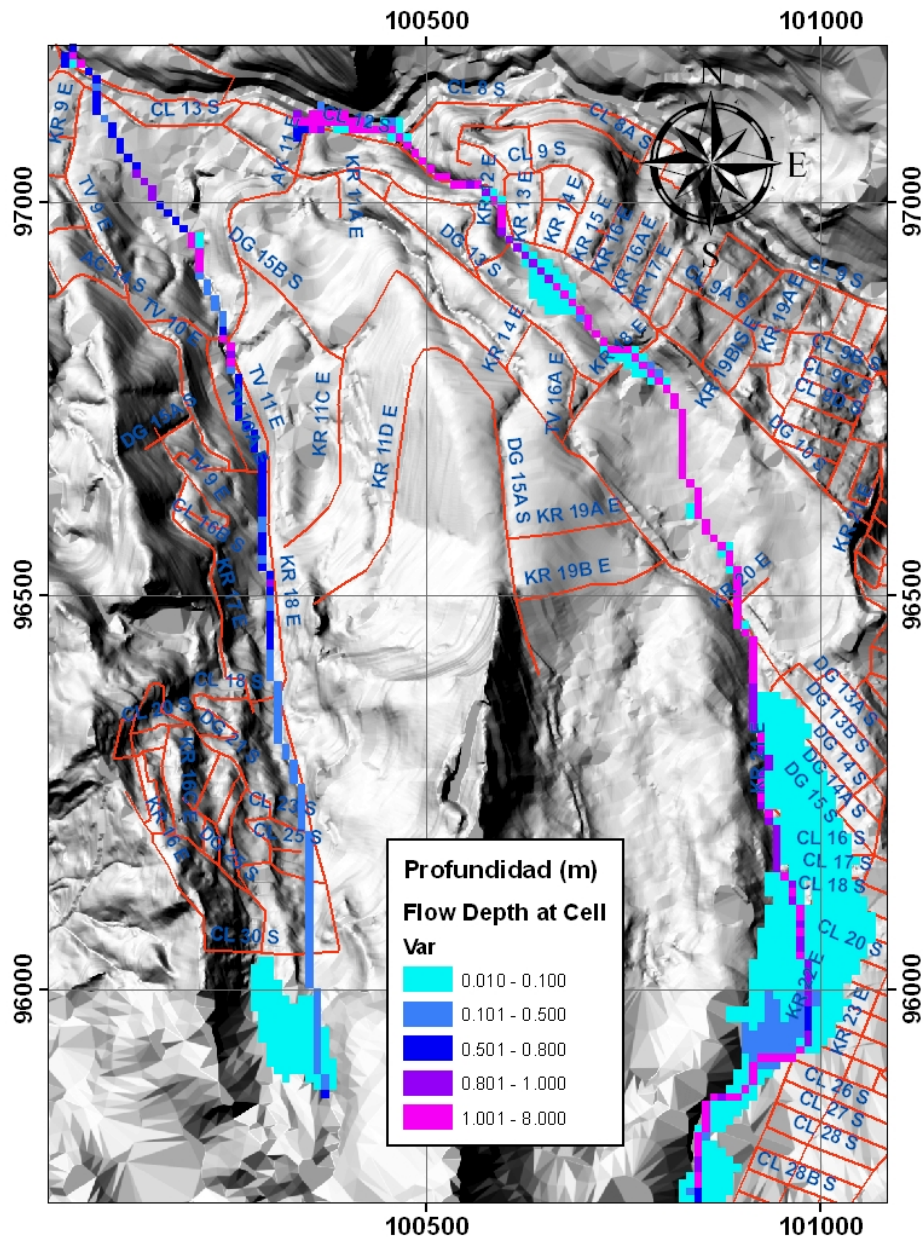


Figura 7-100. Resultados de la modelación matemática con FLO-2D para las quebradas La Pichosa y El Triangulo con obras

Al observar los resultados mostrados en la Figura 7-99, se puede apreciar que en la quebrada El Triangulo, para la sección transversal del canal planteado como

medida de mitigación, el flujo en su totalidad para este evento extremo, es conducido por dicha estructura. Situación similar ocurre en la quebrada La Pichosa, aunque para esta quebrada, el flujo si se desborda con profundidades no superiores a 0.10 m en su parte alta.

7.7.10 ESCENARIO VI

Este escenario presenta los resultados de la simulación para un evento en el que se presente un represamiento del flujo por deslizamientos en las laderas, y el rompimiento del dique debido a la fuerza producida por el flujo. Este escenario se analizó para una condición moderadamente crítica de caudal tanto líquido como sólido, es decir para el caudal de 100 años de periodo de retorno de lluvia, con un sismo de 500 años de probabilidad de ocurrencia.

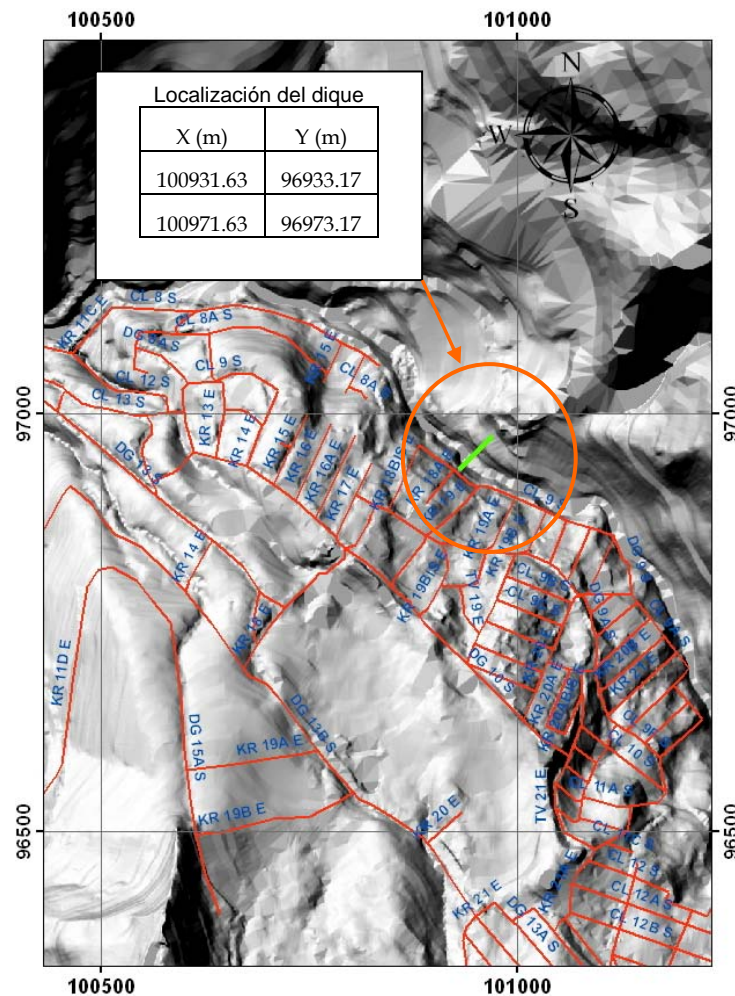


Figura 7-101. Localización del dique para la simulación del rompimiento de presa (el dique esta en el sector de Aguas Claras)

El sitio de colocación del dique en el modelo FLO-2D se indica en la siguiente figura. Este sitio se escogió, dado que es un punto donde el flujo presenta un estrechamiento, y hay una alta susceptibilidad a los deslizamientos. El dique se supuso con una altura de 3 m respecto al lecho del cauce, y su condición de rompimiento se presentaría si el flujo permanece con una altura por encima de la cresta de 0.3 m durante 0.5 horas, condición supuesta para simular este efecto.

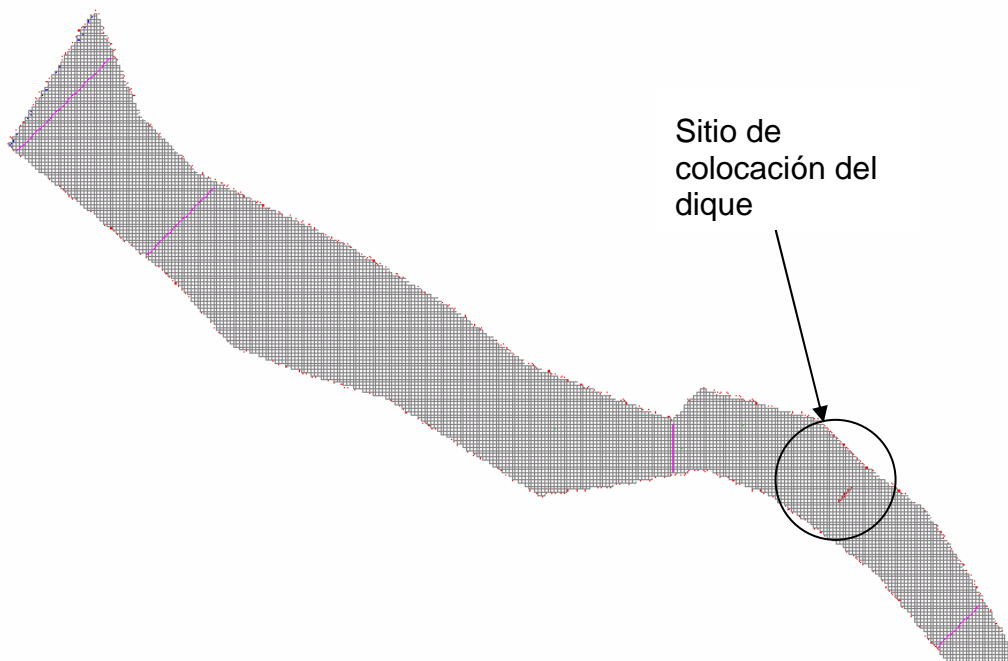
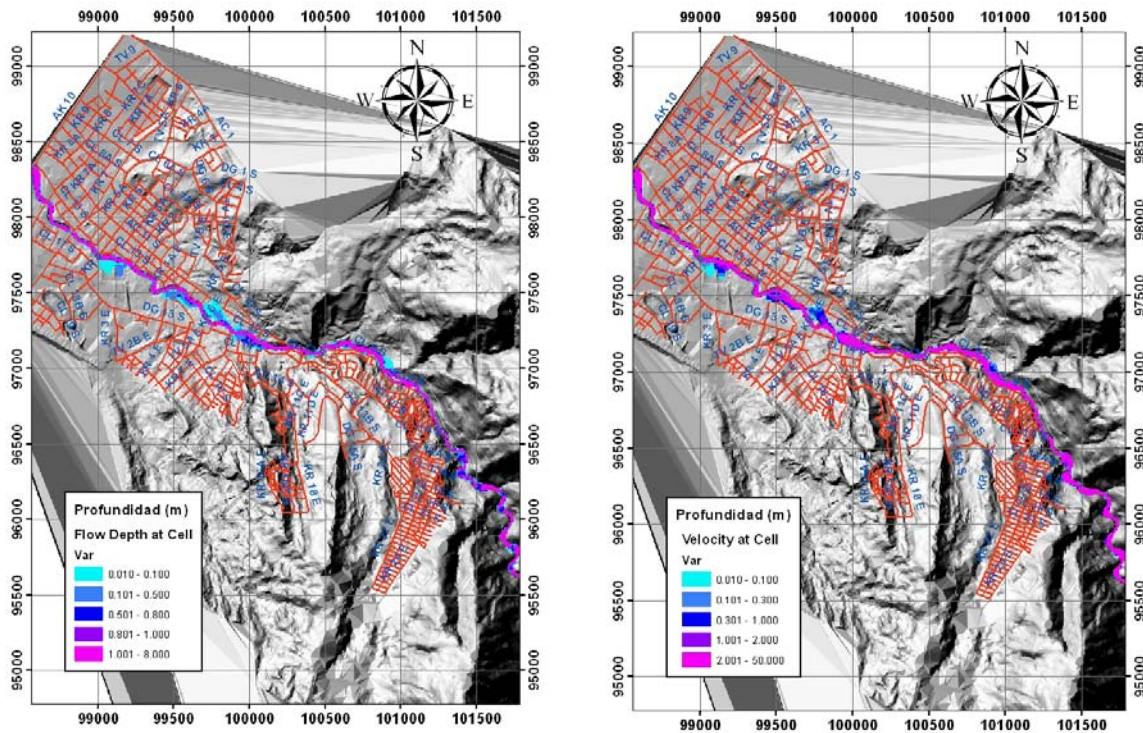


Figura 7-102. Sitio de localización del dique

En los resultados de esta simulación, se puede apreciar que en la zona del dique, como es natural, se presenta un aumento en la profundidad del flujo hasta que el flujo supera la cota de la cresta y para por encima de la obstrucción. Hacia aguas abajo del dique, el flujo tiende a comportarse igual que si no existiese es decir, las profundidades alcanzadas por este son relativamente similares a las del escenario sin dicha obstrucción.



- a.) Profundidad del flujo para el rompimiento e presa b.) velocidad del flujo para el rompimiento e presa

Figura 7-103. Resultados del rompimiento del dique

De acuerdo con la condición de falla del dique, este en algún intervalo de tiempo se rompe generando una onda en el flujo, la cual de acuerdo con los resultados, no afecta en cuanto a profundidades, las zonas hacia aguas abajo. Los resultados tienden nuevamente a ser parecidos a los obtenidos en las anteriores simulaciones del flujo.

CAPITULO 8

ESTIMACIÓN DEL RIESGO PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA SAN CRISTÓBAL

En el presente capítulo se presentan los resultados de los análisis de amenaza vulnerabilidad y riesgo que se desarrollaron para la parte alta de la cuenca de la Quebrada San Cristóbal siguiendo el Marco Teórico presentado en el Capítulo 4 y las Metodologías propuestas en el Capítulo 5.

Los resultados de todos los análisis se presentan en el Anexo E-1. Para cada escenario se presentan los mapas de inundación y velocidad para los diferentes periodos de retorno de la lluvia, aunque en ellos aparece como fondo una imagen con vacíos en el sector de Ramajal y Vitelma, estas zonas fueron incluidas en los análisis generales. Con base en estos mapas se construyeron los mapas de amenaza para diferentes profundidades de flujo, velocidades, caudales unitarios y número de Froude. Para esos mismos parámetros la modelación de la respuesta estructural de las edificaciones permitió determinar la vulnerabilidad de todos los predios. Finalmente con base en el costo de cada predio y el producto de los mapas de amenaza y vulnerabilidad se obtuvieron los mapas de riesgo económico. Para todos los escenarios se determinó el nivel de pérdidas económicas esperadas, las cuales se discriminaron entre las debidas a afectación a estructuras y las producidas por afectación en predios rurales. Por otra parte la valoración de pérdidas se hizo para las quebradas San Cristóbal, El Triángulo, La Pichosa, Ramajal y Vitelma.

En relación con el riesgo social se determinó para el escenario de inundaciones la población potencialmente expuesta como el producto de la amenaza y el total de personas afectadas por los flujos. Con base en esos mapas se determinó el número de personas potencialmente en riesgo para cada escenario, en este caso se asumieron valores de vulnerabilidad física para las personas, las cuales se afectaron por el índice de vulnerabilidad social tal como se explico en el Capítulo 4-Marco Teórico.

Debido a que los aportes de sedimentos en la cuenca por procesos de erosión e inestabilidad no incrementan considerablemente la concentración de los flujos, no se identificaron diferencias significativas entre los diferentes análisis, por lo tanto se presenta a continuación una descripción general de los resultados en relación con los diferentes parámetros considerados.

Los mapas de inundación muestran que para periodos de retorno cortos, esto es 5 a 10 años, los caudales en la quebrada San Cristóbal transitan canalizados a lo largo de su cauce y no afecta zonas por fuera de la ZMPA. En la parte alta de la cuenca se observan niveles de agua muy bajas coincidiendo con los valles amplios que se determinaron en las secciones transversales. En la parte media se observa un estrechamiento del cauce por un control geológico. En este sector, como era de esperar se incrementan los niveles de agua alcanzando valores del orden de 1.0m. En la parte inferior en el sector de los Barrios Aguas Claras, Montecarlo y La Gran Colombia se tiene el flujo bien definido en el cauce y dentro de la ZMPA.

En las quebradas La Pichosa y El Triángulo se puede observar que aun para periodos de retorno cortos se presenta desborde de las aguas. Aunque las profundidades no son muy altas si alcanzan a afectar zonas por fuera de la ZMPA. Estos resultados son coherentes con los reportes de antecedentes, en los cuales se referencia un proceso en la quebrada La Pichosa en 1994 y procesos en la quebrada El Pilar (El Triángulo) (Ver Capitulo 2- Antecedentes) donde para esta quebrada se han reportado inundaciones y flujos de escombros de basuras dejadas dentro del cauce. Se identifica para esa zona que hay predios dentro de la ZMPA que se pueden ver afectados por inundaciones.

De manera similar para periodos de retorno cortos en la cuenca de la quebrada Ramajal se observa la posibilidad de inundación, sin embargo, el modelo en esta zona no consideró que la quebrada esté entubada, lo que representaría un caso hipotético de obstrucción de dicha tubería. Esto sugiere que la limpieza de esa estructura es muy importante para mantener unos niveles de amenaza y riesgo bajos.

Para la quebrada Vitelma se observa que en la parte superior los flujos se concentran a lo largo del cauce, en donde las profundidades no superan un metro. En la parte media antes de que el cauce se entube, se muestra que hay una zona en donde el cauce se desborda y se alcanzan profundidades que sobrepasan el metro. En el estudio contratado por la EAAB con la empresa Fabio Pico & Cia, se recomienda canalizar este sector, que a la luz de la presente modelación se considera válida dicha recomendación. Por su parte en la zona baja de la quebrada se tiene un entubado que está controlando la posibilidad de inundación del sector. Con base en la posición del punto de inicio de la tubería, el cual se determinó del estudio de Fabio Pico, y el punto final, el cual se identificó en los trabajos de campo del presente estudio, se trazó el alineamiento posible de la tubería. La zona inundable que da de la modelación de los flujos sería un escenario de taponamiento de la tubería, debido a esto una de las medidas de mitigación de este sector es el adecuado manejo de basuras en la cuenca.

En las entregas de las quebradas afluentes al Río San Cristóbal se observa un efecto de represamiento que genera la inundación de las partes bajas, esto sugiere la necesidad de evitar este tipo de represamientos mediante campañas de limpieza.

En la medida que los periodos de retorno aumentan se observa un comportamiento similar al descrito anteriormente. En la parte superior de la Quebrada San Cristóbal los niveles prácticamente permanecen constantes, indicando que la forma del cauce es capaz de evacuar los flujos así sean importantes. De paso se puede concluir que un sistema de alerta con base en niveles de flujo en la quebrada no sería muy útil porque no mostraría diferencias importantes que permitan ser utilizadas como alerta.

En la parte media, con el aumento de los caudales se generalizan las altas profundidades (mayor a 1.5 m), sin embargo los flujos siguen siendo concentrados en sus secciones estrechas. Igualmente en la parte baja se genera un aumento de los niveles pero no se desbordan de sus bancas.

Para las cuencas de las quebradas Ramajal, La Pichosa, El Triángulo y Vitelma se siguen presentando las inundaciones sin embargo los niveles de agua no se incrementan, manteniéndose por debajo de 0.5 m. Para el caso de la quebrada Vitelma se observa que a medida que aumentan los periodos de retorno, en la parte baja se genera una concentración de flujos a lo largo de las calles, los niveles de agua en esta zona puede estar entre 0.5 y 1.0m de profundidad.

Con relación a las velocidades se observa que en la parte alta las bajas profundidades están acompañadas también de bajas velocidades, excepto algunos sitios muy puntuales que se estima están asociados con estrechamientos del cauce. Como era de esperarse, en la parte media con el estrechamiento del cauce aumentan las velocidades, sin embargo esta zona está geológicamente controlada y no se esperan procesos de socavación severos en este sector.

En términos de velocidad en las quebradas La Pichosa, El Triángulo, Ramajal y Vitelma, en la medida que se incrementan los caudales se genera un incremento de velocidad dentro del cauce pero en las zonas de inundación es baja, esto favorece que los efectos en las viviendas en la zona de inundación no sean significativos.

Para periodos de retorno superiores a 50 años se observa que a lo largo de todas las quebradas se aumentan las velocidades.

8.1 Evaluación de la amenaza

Como se mostró en el Capítulo 5 la evaluación de amenaza se realizó para escenarios de lluvia y sismo, adicionalmente se consideraron por separado los diferentes volúmenes de sedimentos en cada escenario. A continuación se presentan los resultados de los análisis de amenaza.

En las quebradas La Pichosa, El Triángulo y Vitelma en las zonas inundables, la probabilidad de ocurrencia de la profundidad 0.1 m es baja, esto significa que aunque se inunde difícilmente la altura de agua supera este valor.

En la medida que aumenta la profundidad del flujo la probabilidad de que se presente disminuye. Se observa que profundidades de 0.5 m son muy posibles a lo largo de los cauces, mientras que en las zonas de inundación la probabilidad de que le agua llegue a valores entre 0.5 y 0.8 m es baja.

Para el cauce principal de la Quebrada San Cristóbal se tiene una probabilidad alta de que el flujo alcance valores del orden de 0.8 m, sin embargo para un nivel de 1.0m la probabilidad empieza a disminuir de manera importante. Profundidades superiores a 1.5m son posibles sólo a lo largo de los cauces, lo que es coherente con la concentración de flujos.

Mirando los resultados en función de las velocidades se observa que la probabilidad de que la velocidad del flujo sea superior a 1.5 m/s es muy alta, esto está relacionado con las altas pendientes de la cuenca y el cauce. En las zonas de las quebradas La Pichosa, El Triángulo, Ramajal y Vitelma, donde se desborda el flujo, es más importante la velocidad que la profundidad.

En términos de caudales unitarios y número de Froude las conclusiones son similares a lo encontrado con velocidades.

8.2 Evaluación de la vulnerabilidad

8.2.1 Vulnerabilidad física de edificaciones

Inicialmente se identificó, por medio del SIG, la distribución del tipo de viviendas en el área de estudio, definida inicialmente por una corrida preliminar con caudales extremos para la cuenca para un periodo de retorno de 1000 años, junto a esta primera aproximación se decidió tomar una franja adicional de dos cuadras a lado y lado de la obtenida con la modelación. Esta labor se realizó con la información de Catastro Distrital, en ella se identificó principalmente el tipo de “armazón” como se identifica en esta base de datos al sistema estructural. De este ejercicio se identificó la distribución, presentada en la Tabla 8-1 y en la Figura 8-1.

TIPO DE ESTRUCTURA	No. De Viviendas
Concreto cuatro o más pisos	178
Concreto hasta tres pisos	118
Ladrillo y/o bloque	3474
Madera	69
Prefabricado	36
Lotes	989
<i>Población Total</i>	4864

Tabla 8-1. Distribución de viviendas por tipo estructural.

Con esta identificación inicial se realizó una verificación de campo de las estructuras, donde se observó el predominio de las estructuras de mampostería corroborando la información que aparece en la Tabla 8-1., vale la pena anotar que muchos predios identificados con algún tipo de estructura hacen referencia simplemente al cerramiento de un lote, en la base de datos se toma como una estructura en mampostería de 1 piso.

A la vez que se realizó la visita de campo, se tomó una pequeña muestra de los diferentes tipos estructurales predominantes en la zona con el propósito de realizar la modelación estructural lo más cercana a la realidad del sector, en las fotografías 8 - 1. a 8 - 7. se muestran las estructuras. Los formatos de campo se presentan en el Anexo E-2.

Para la cuenca de la quebrada Vitelma, debido a la negativa de Catastro de suministrar la información catastral de dicha zona, se asumió una vulnerabilidad uniforme para toda la zona tomando una estructura de dos pisos en mampostería que es la que más se ajusta a lo observado en campo.



Fotografía 8 - 1. Estructura en mampostería de 2 pisos, con irregularidades en planta y altura.

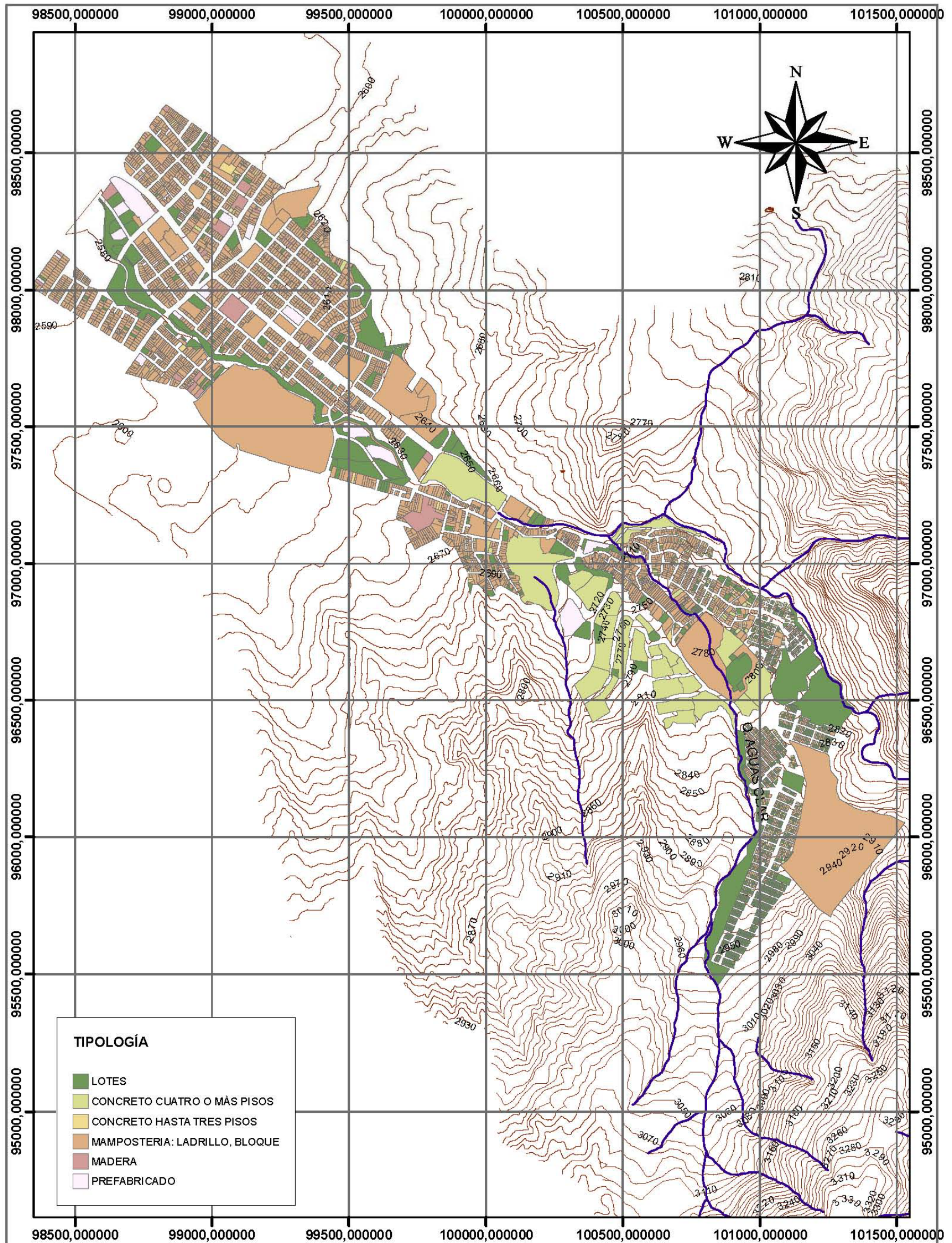


Figura 8-1. Distribución de tipologías de viviendas, tomada de la base de datos de Catastro Distrital.



Fotografía 8 - 2. Estructuras de uno y dos pisos, con estructura en mampostería. Tipología predominante en la zona de estudio



Fotografía 8 - 3. Estructuras en mampostería confinada



Fotografía 8 - 4. Estructura de dos pisos aporcada



Fotografía 8 - 5. Estructura prefabricada



Fotografía 8 - 6. Estructura en mampostería estructural



Fotografía 8 - 7. Estructura en madera.

De las estructuras muestreadas se plantearon las estructuras tipo que fueron modeladas en ETABS (los archivos de los modelos son presentados en el Anexo E-3). Estructura Tipo 1, corresponde al sistema estructural de pórtico en concreto de dos pisos, la Estructura Tipo 2, a sistemas en mampostería no confinada de un piso, la Estructura Tipo 3, a sistemas en mampostería de dos pisos, la Estructura Tipo 4, a estructuras en madera de un piso y la Estructura Tipo 5, a estructuras prefabricadas de un piso. Aunque es una muestra pequeña es una guía para obtener los órdenes de magnitud de los desplazamientos en las viviendas. Los esquemas de los modelos utilizados son presentados en el Anexo E-4.

Posterior a la definición de las estructuras calcularon diferentes presiones sobre las mismas, estas diferentes presiones representan diferentes alturas de lamina de agua que pueden impactar la vivienda, pero como también fue necesario considerar diferentes densidades de fluido se tomaron densidades de $1.2 \rho_w$ y $1.4 \rho_w$, los diferentes rangos de presiones son mostrados en la Tabla 8-2. Para el caso de la condición hidrodinámica se utilizo la simplificación propuesta por Kelman donde convierte la presión hidrodinámica en un prisma triangular de presiones.

Se debe aclarar que la densidad de 1.4 ya es un límite superior de la densidad agua-sólidos (de hecho es el valor de suelos orgánicos) y el valor de 1.2 es el que corresponde a las concentraciones encontradas para la cuenca del orden de 0.2, siendo precisos la densidad sería 1.16. Estos valores fueron calculados con la siguiente formulación:

$$\rho_m = \rho + C(\rho_s - \rho)$$

Donde

ρ_m : Densidad de la mezcla

ρ : Densidad del agua

ρ_s : Densidad de sólidos

C: Concentración de sólidos

Y la densidad sería entonces $\rho_f = \rho + \frac{\rho_s}{\rho_t} = \rho_f = 1 + \frac{0.2}{1.2} = 1.16$

Agua = 9,81KN/m³						
Condición hidrostática		Condición Hidrodinámica				
H	P	H'	V	ΔP	ΔH	Ph
0,02	0,1962	0,02	0,02	0,00002	2,03874E-06	0,1962
0,08	0,7848	0,08	0,08	0,00032	3,26198E-05	0,7848
0,18	1,7658	0,18	0,18	0,00162	0,000165138	1,7658
0,32	3,1392	0,32	0,32	0,00512	0,000521916	3,1392
0,5	4,905	0,5	0,5	0,0125	0,00127421	4,905
0,72	7,0632	0,72	0,72	0,02592	0,002642202	7,0632
0,98	9,6138	0,98	0,98	0,04802	0,004895005	9,6138
1,28	12,5568	1,29	1,28	0,08192	0,008350663	12,5568
1,62	15,8922	1,63	1,62	0,13122	0,013376147	15,8922
2	19,62	2,02	2	0,2	0,02038736	19,62

Con1 = 11,77KN/m³						
Condición hidrostática		Condición Hidrodinámica				
H	P	H'	V	ΔP	ΔH	Ph
0,02	0,1962	0,02	0,02	0,00002	1,7094E-06	0,1962
0,07	0,7848	0,08	0,08	0,00032	2,73504E-05	0,7848
0,15	1,7658	0,18	0,18	0,00162	0,000138462	1,7658
0,27	3,1392	0,32	0,32	0,00512	0,000437607	3,1392
0,42	4,905	0,5	0,5	0,0125	0,001068376	4,905
0,6	7,0632	0,72	0,72	0,02592	0,002215385	7,0632
0,82	9,6138	0,98	0,98	0,04802	0,004104274	9,6138
1,07	12,5568	1,29	1,28	0,08192	0,007001709	12,5568
1,36	15,8922	1,63	1,62	0,13122	0,011215385	15,8922
1,68	19,62	2,02	2	0,2	0,017094017	19,62

Con2 = 13,73KN/m³						
Condición hidrostática		Condición Hidrodinámica				
H	P	H'	V	ΔP	ΔH	Ph
0,01	0,1962	0,01	0,02	0,00002	1,45985E-06	0,1962
0,06	0,7848	0,06	0,08	0,00032	2,33577E-05	0,7848
0,13	1,7658	0,13	0,18	0,00162	0,000118248	1,7658
0,23	3,1392	0,23	0,32	0,00512	0,000373723	3,1392
0,36	4,905	0,36	0,5	0,0125	0,000912409	4,905
0,52	7,0632	0,52	0,72	0,02592	0,001891971	7,0632
0,7	9,6138	0,71	0,98	0,04802	0,003505109	9,6138
0,92	12,5568	0,92	1,28	0,08192	0,005979562	12,5568
1,16	15,8922	1,17	1,62	0,13122	0,009578102	15,8922
1,43	19,62	1,45	2	0,2	0,01459854	19,62

Tabla 8-2. Condiciones de presión para diferentes alturas de lamina de agua

Al comparar las alturas de lamina para las diferentes presiones que ejerce el fluido con diferentes densidades se observa que las variaciones en altura son mínimas, por esta razón se decidió hacer la modelación únicamente con agua ($\gamma = 9.8 \frac{KN}{m^3}$) con las derivas obtenidas bajo estas presiones se generaron las curvas de desplazamiento, ante la acción de agua, a modo de ejemplo se presenta el caso de las estructuras de mampostería de dos pisos. En la Figura 8-2 se muestra la curva que relaciona la altura de la lámina de agua con la deriva en la estructura.

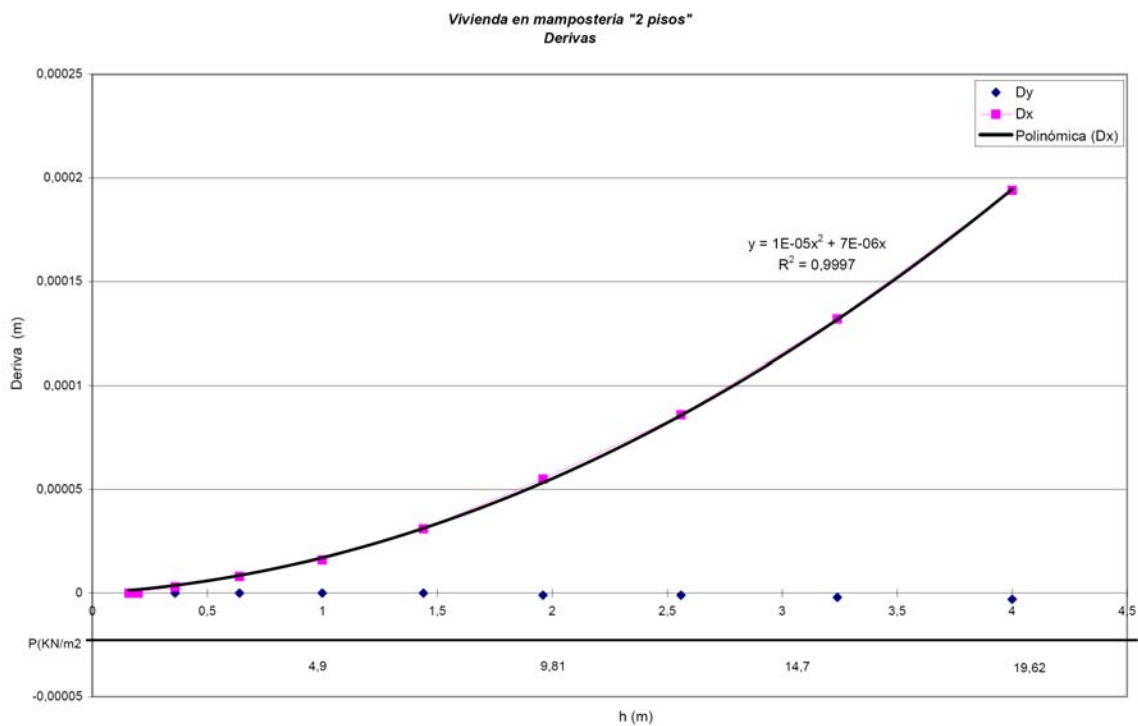


Figura 8-2. Curva de derivas para estructuras en mampostería de dos pisos.

Con estos resultados se ingresa a las curvas "Periodo de la estructura (T_a) Vs. Deriva", propuestas por Sánchez Silva (actualizadas con los criterios de la NSR-98), para estructuras de mampostería, que se muestra en la Figura 8-3.

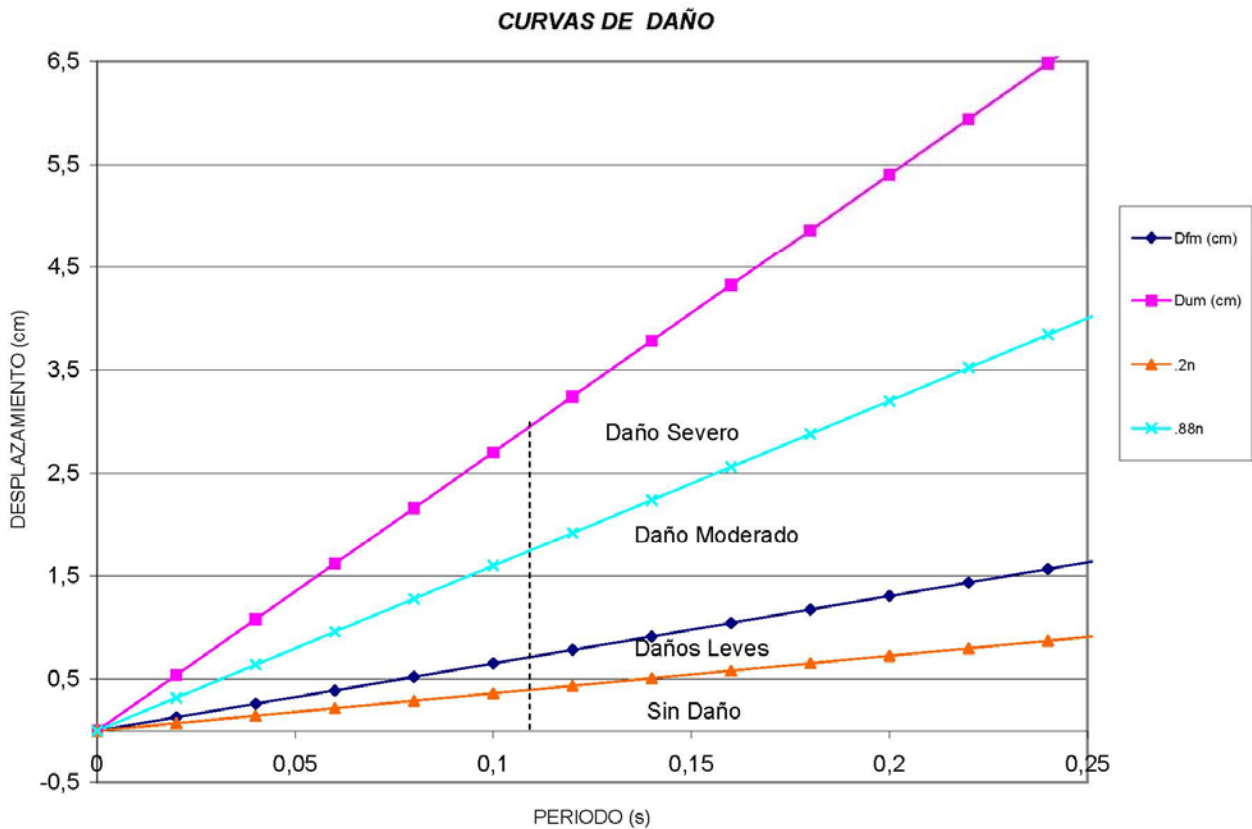


Figura 8-3. Curvas de daño para estructuras en mampostería.

Con estas curvas de daño se establecen los rangos de daño para la estructura, de tal forma que el 100% del daño se presentara cuando la estructura sobrepase desplazamiento último de la mampostería.

De esta forma para las edificaciones de dos pisos en mampostería los porcentajes de daño se presentan en la Tabla 8-3.

Vivienda de 2 pisos		
Limites		
Rangos de Daño	% de Daño	
Inferior	0	0
No Daño	0,61	13
Daños Menores	1,09	24
Daño Moderado	2,67	59
Daño Severo	4,52	100

Tabla 8-3. Porcentajes de Daño para estructuras en mampostería de dos pisos.

Las curvas de vulnerabilidad física para las demás estructuras son presentadas en el Anexo E-5.

Los mapas de vulnerabilidad física muestran que las estructuras de mampostería y de madera pueden sufrir daños menores para niveles de agua inferiores a 0.8 m, mientras que las estructuras aporricadas o reforzadas no sufren daños. Cuando el nivel de agua supera el metro se observa que los daños en estructuras de mampostería y de madera se vuelven moderados y que se empiezan a presentar daños menores en estructuras reforzadas. Por esta razón se recomienda utilizar este valor como parámetro para análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Para alturas de flujo de 1.5 los daños en las estructuras de mampostería y madera se vuelven severos mientras que los de estructuras reforzadas siguen siendo menores.

En términos de velocidad se observa que para velocidades de 1.5 m/s los efectos en las estructuras de mampostería y de madera son menores, lo que permite rebatir este límite como parámetro de análisis como se sugiere en la literatura internacional.

Con relación al producto de la profundidad y la velocidad se observa que un valor de 1.0 m/s-m ya produce daños moderados en estructuras de mampostería y madera, este podría ser otro valor útil para los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, sin embargo, pensando en los estudios comunes donde no se hace una modelación rigurosa y puede ser más fácil tener valores de altura y no de velocidad, se prefiere trabajar con la profundidad de 1.0 m.

Los valores de número de Froude de 0.6 y 1.0 no son útiles para análisis de riesgo.

8.2.2 Vulnerabilidad de líneas vitales

En esta labor se realizó un trabajo de campo en el que se identificaron las estructuras que, a lo largo del cauce, podrían sufrir algún tipo de afectación frente a una avalancha o avenida torrencial. Los formatos de campo son presentados en el Anexo E-6. Desafortunadamente no se pudo obtener información sobre vulnerabilidad física y cuantificación de los daños de este tipo de estructuras de manera para obras vitales no se pudo pasar de la identificación de los elementos en riesgo.

8.2.3 Vulnerabilidad Social

Para la evaluación de la vulnerabilidad social se siguió la metodología planteada en el capítulo 5, y su resultado es presentado en el Anexo E-7. En la Tabla 8-4 se presentan los resultados de la evaluación de vulnerabilidad social para los diferentes barrios.

Al analizar los tres parámetros que definen el Índice de Vulnerabilidad, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

La exposición es alta en barrios con desarrollos urbanos en zonas no deprimidas. Los barrios que presentan mayores valores de exposición son Nariño Sur (99), San Cristóbal Sur (90) y San Blas (78), debido a que en esas zonas las densidades de población y los elementos expuestos son altos. El valor de vulnerabilidad de San Blas puede ser mayor ya que el valor del indicador E1 no se pudo establecer.

La vulnerabilidad es alta para barrios marginales y de invasión. Estos valores altos los tienen los barrios: Corinto (75), Laureles (74) y Tibaque urbano (68). Esto se debe a que por sus características de barrios deprimidos, no tiene acceso a servicios de saneamiento básico y su nivel de ingresos no permitirá una recuperación rápida en caso de un evento. El valor de vulnerabilidad de Corinto puede ser mayor ya que el valor del indicador V3 no se pudo establecer.

La capacidad evaluada en los barrios de la zona permite observar que en general todos los barrios presentan una capacidad baja para responder ante un evento (<50%). Esta capacidad se evaluó considerando factores internos y externos de cada barrio.

Los barrios con mayor capacidad de respuesta son: Aguas Claras (52), Velódromo (50) y Ramajal (49). Se puede observar que la capacidad no es función del tipo de asentamiento y obedece en gran medida a la voluntad política.

El índice de vulnerabilidad, representa la diferencia entre cómo afectaría un evento a la población y cómo ella es capaz de responder ante dicho evento. Sin embargo se deben considerar las condiciones particulares de cada barrio para poder interpretar mejor la metodología.

Si se observa el valor del índice de vulnerabilidad para el barrio Nariño Sur, se aseguraría que es alto y que por ende se deberían presentar los mayores efectos después de ocurrir un evento, sin embargo, lo que está representando es que Nariño Sur tiene la mayor cantidad de elementos expuestos de la zona de estudio. Lo mismo ocurre para el barrio Santa Ana Sur y San Cristóbal.

Este índice se puede utilizar para establecer los puntos críticos de cada barrio y así poder tomar medidas correctivas, antes de que se presente un evento.

El índice puede servir para determinar los barrios que mejor responderían ante un evento. Si se observa la tabla del índice y se analizan las graficas barrios que presentan menores valores, se puede concluir que aquellos con valores bajos de índice y valores similares de exposición, vulnerabilidad y capacidad, serán los que menores efectos sentirán ante un evento.

8.3 Valoración de costos

8.3.1 Valoración del área urbana

Tal como se describía en el capítulo 5, se logró caracterizar la construcción, determinando 6 tipos de construcción de tipo residencial dependiendo del puntaje obtenido por tanto

TIPO DE CONSTRUCCIÓN RESIDENCIAL	PUNTAJE
TIPO 1	0-10
TIPO 2	11-28
TIPO 3	29-46
TIPO 4	47-64
TIPO 5	65-82
TIPO 6	MAYOR A 82

Tabla 8-4. Clasificación de la construcción, en virtud del puntaje obtenido

Es importante aclarar que un sólo predio puede contener más de una actividad, es decir puede encontrar predios sobre los cuales se desarrolle varias actividades económicas porque en el primer piso se desarrolla la vivienda y en el segundo el comercio, etc.

Una vez capturada esta información, a través de modelos econométricos y de investigación directa en el mercado, se establece el valor por metro cuadrado de la tierra y el valor por metro cuadrado de construcción que dará lugar a la valuación total del inmueble. La Figura 8-4. representa los predios clasificados por rango de valores por metro cuadrado de terreno, donde se identifica que los más económicos, se encuentran localizados en el costado suroriental de la zona de estudio, es decir los predios que colindan con la zona suburbana. De los 4864 predios de la zona de estudio, 1387 se encuentran entre \$0,00 y \$18.400,00, es decir un 28,51%, nótese que los 61 predios con valor \$0,00 corresponden a mejoras (construcciones en predio ajeno) por lo tanto el valor nominal del lote es \$0,00 y se valora solamente la construcción; 582 están entre \$18.400,1 y

\$49.600,00 es decir 11,98%; 484 están entre \$49.600,1 y \$107.200,00 o sea 9,95%; 1877 están entre \$107.200,1 y \$183.912,00, es decir 38,58 % y 533 están entre \$183.912,1 y \$481.645,00 esto es 10,95%; en contraste con la zona que representa el área de terreno más económica, se evidencia la más costosa en el costado noroccidental de la zona de estudio donde los predios colindan con la Carrera 10.

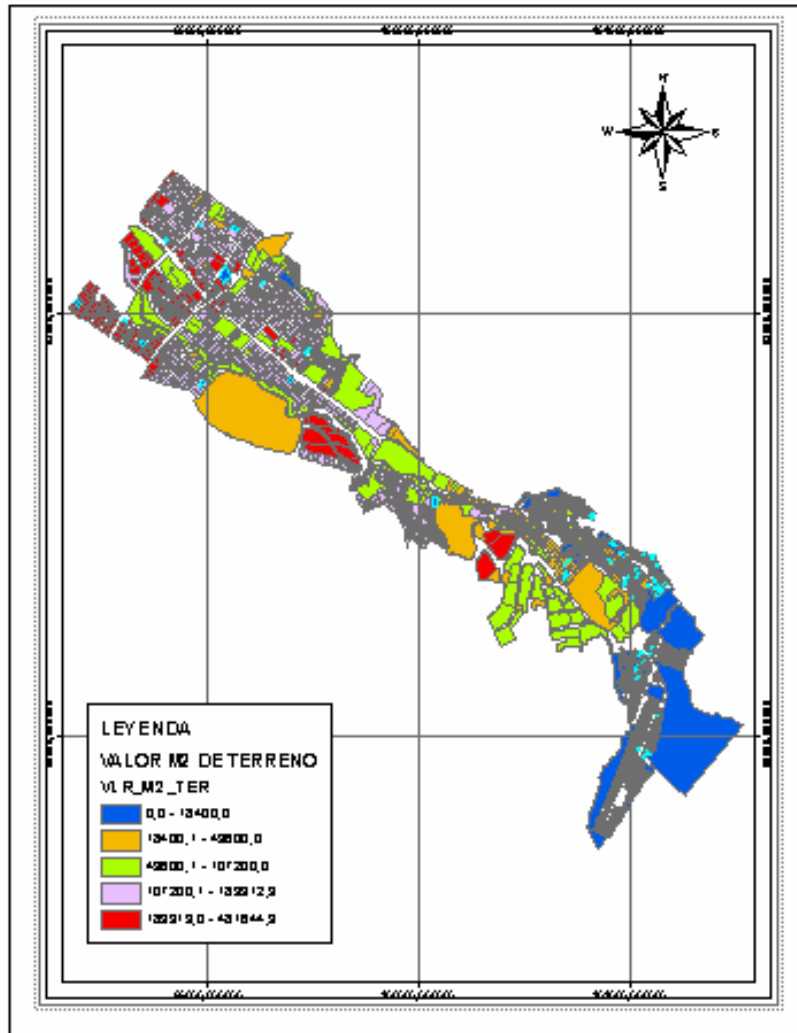


Figura 8-4. Clasificación predial por valor metro cuadrado de terreno.

La Figura 8-5. representa los predios clasificados por rango de valores por metro cuadrado de construcción. De 4864 predios 1011 predios corresponden a lotes (20,78%), así que no tienen construcción por lo tanto el valor de la construcción es 0; 284 predios tienen sus valores de construcción entre \$11.045,00 y \$37.952,00 (5,83%); 1085 predios están entre \$37.952,00 y \$101198,00 (22,30%); 1680 predios están entre \$101.198,1 y \$159.150,00 (34,53%); 798 predios están entre

\$159.150,00 y \$337.421,00 (16,40%); y 30 predios estan entre \$337.421,00 y \$1'037.675,00 (0.61%).

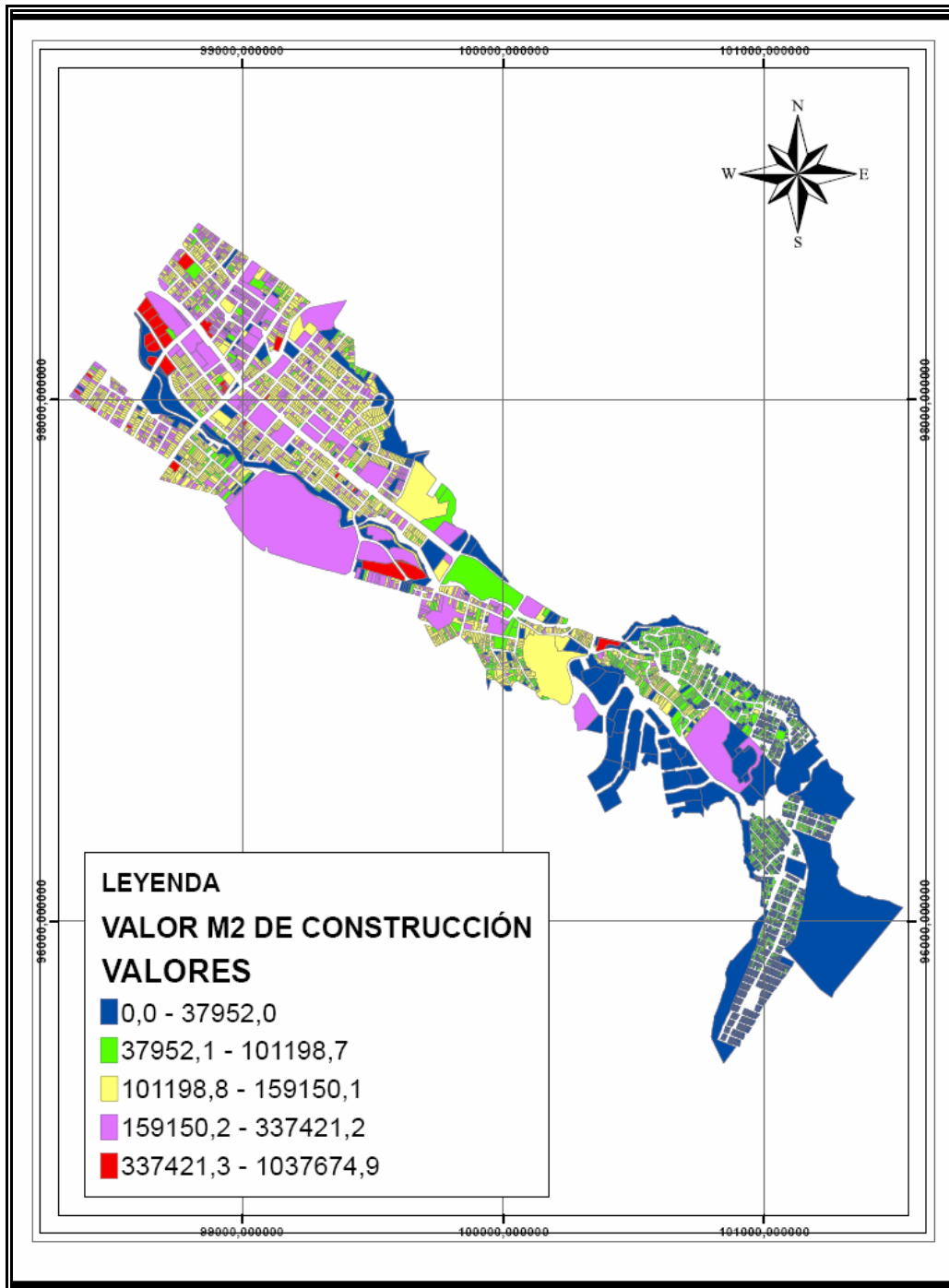


Figura 8-5. Clasificación predial por valor metro cuadrado de construcción

Una vez desarrollada la metodología propuesta se logro obtener un mapa de valores tal como se ilustra en la Figura 8-6.

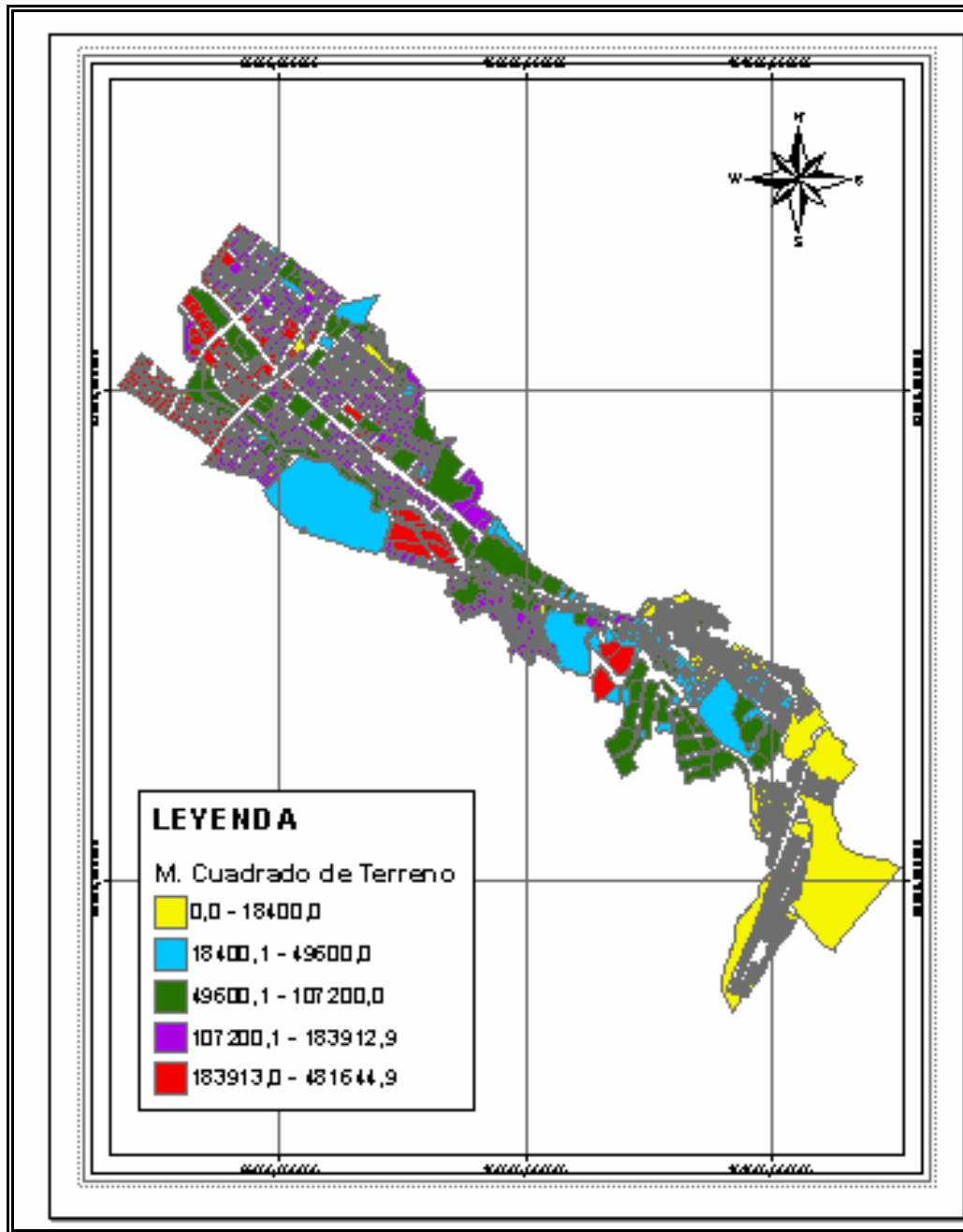


Figura 8-6. Distribución por metro cuadrado

El comportamiento estadístico según rangos de trabajo para valor metro cuadrado de terreno es:

VLR_M2_TER	
Media	2039,875132
Error típico	81,24715045
Mediana	907,5
Moda	907,5
Desviación estándar	2959,672107
Varianza de la muestra	8759658,979
Curtosis	4,237077422
Coefficiente de asimetría	2,364014772
Rango	17719,4
Mínimo valor por metro cuadrado de terreno	680,6
Máximo por metro cuadrado de terreno	18400
Suma	2706914,3
NUMERO DE LOTES	1327

Tabla 8-5. Comportamiento estadístico para el primer rango.

VLR_M2_TER	
Media	36272,23316
Error típico	312,4701251
Mediana	40000
Moda	40000
Desviación estándar	7538,240578
Varianza de la muestra	56825071,01
Curtosis	-1,475969588
Coefficiente de asimetría	-0,203073195
Rango	23518
Mínimo valor por metro cuadrado de terreno	26082
Máximo por metro cuadrado de terreno	49600
Suma	21110439,7
NUMERO DE LOTES	582

Tabla 8-6. Comportamiento estadístico para el segundo rango.

VLR_M2_TER	
Media	65370,34876
Error típico	674,1090819
Mediana	54447,4
Moda	54447,4
Desviación estándar	14830,3998
Varianza de la muestra	219940758,3
Curtosis	0,073097122
Coefficiente de asimetría	1,105458721
Rango	55200
Mínimo valor por metro cuadrado de terreno	52000
Máximo por metro cuadrado de terreno	107200
Suma	31639248,8
NUMERO DE LOTES	484

Tabla 8-7. Comportamiento estadístico para el tercer rango.

VLR_M2_TER	
Media	125630,5612
Error típico	700,1619268
Mediana	112000
Moda	112000
Desviación estándar	15403,56239
Varianza de la muestra	237269734,3
Curtosis	-1,871886811
Coefficiente de asimetría	0,303905977
Rango	33652,3
Mínimo valor por metro cuadrado de terreno	110347,7
Máximo por metro cuadrado de terreno	144000
Suma	60805191,6
NUMERO DE LOTES	484

Tabla 8-8. Comportamiento estadístico para el cuarto rango.

VLR_M2_TER	
Media	223044,265
Error típico	1693,94461
Mediana	216000
Moda	216000
Desviación estándar	39107,7482
Varianza de la muestra	1529415968
Curtosis	25,7795612
Coficiente de asimetría	4,67278973
Rango	297732
Mínimo valor por metro cuadrado de terreno	183912,9
Máximo por metro cuadrado de terreno	481644,9
Suma	118882593
NUMERO DE LOTES	533

Tabla 8-9. Comportamiento estadístico para el quinto rango.

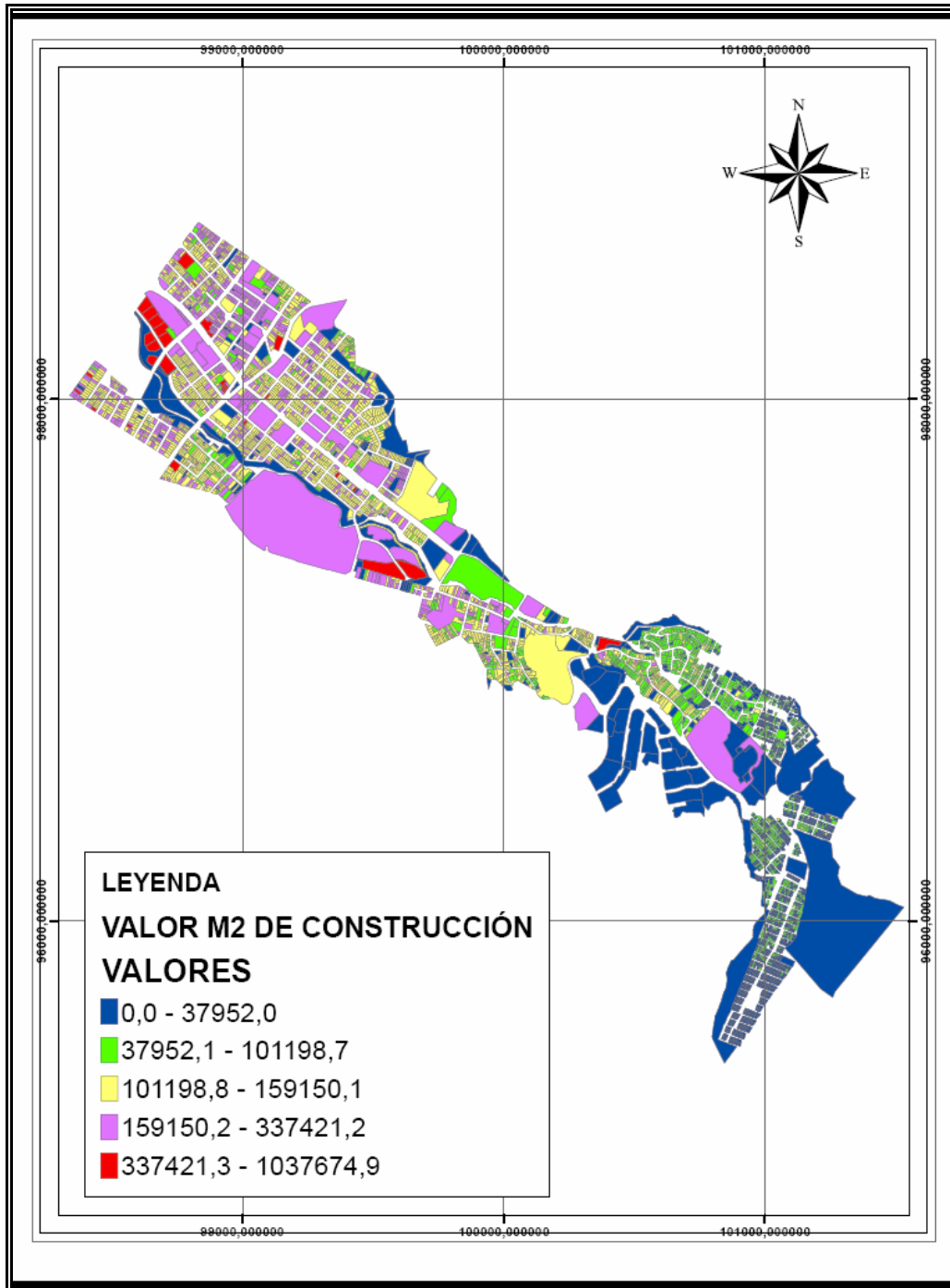


Figura 8-7. Valor por metro cuadrado

Y el comportamiento estadístico según rangos de trabajo para valor metro cuadrado de construcción es:

Rango 1 (VR/m2 de construcción)	
Media	21995,25317
Error típico	557,5317879
Mediana	22165,35
Moda	11343,2
Desviación estándar	9395,692696
Varianza de la muestra	88279041,24
Curtosis	-1,512052899
Coefficiente de asimetría	0,162058067
Rango	26906,2
Mínimo valor por metro cuadrado de construcción	11045,8
Máximo por metro cuadrado de terreno construcción	37952
Suma	6246651,9
NUMERO DE LOTES	284

Tabla 8-10. Comportamiento estadístico para el primer rango.

Rango 2 (VR/m2 de construcción)	
Media	71022,9234
Error típico	528,571497
Mediana	71803,3
Moda	78952,2
Desviación estándar	17418,8168
Varianza de la muestra	303415180
Curtosis	-1,03265778
Coefficiente de asimetría	-0,08402705
Rango	63190,6
Mínimo valor por metro cuadrado de construcción	38008,1
Máximo por metro cuadrado de terreno construcción	101198,7
Suma	77130894,8
NUMERO DE LOTES	1086

Tabla 8-11. Comportamiento estadístico para el segundo rango.

Rango 3 (VR/m2 de construcción)	
Media	131638,066
Error típico	381,906631
Mediana	131772,45
Moda	139963
Desviación estándar	15653,5138
Varianza de la muestra	245032493
Curtosis	-1,05374376
Coefficiente de asimetría	-0,08737714
Rango	57641,5
Mínimo valor por metro cuadrado de construcción	101508,6
Máximo por metro cuadrado de terreno construcción	159150,1
Suma	221151951
NUMERO DE LOTES	1680

Tabla 8-12. Comportamiento estadístico para el tercer rango.

Rango 4 (VR/m2 de construcción)	
Media	186864,286
Error típico	1120,24013
Mediana	176537,2
Moda	166286,2
Desviación estándar	31645,5445
Varianza de la muestra	1001440488
Curtosis	5,13952638
Coefficiente de asimetría	2,17026167
Rango	178073
Mínimo valor por metro cuadrado de construcción	159348,2
Máximo por metro cuadrado de terreno construcción	337421,2
Suma	149117700
NUMERO DE LOTES	798

Tabla 8-13. Comportamiento estadístico para el cuarto rango.

Rango 5 (VR/m2 de construcción)	
Media	473679,6786
Error típico	17009,54557
Mediana	470724,45
Moda	#N/A
Desviación estándar	90006,05501
Varianza de la muestra	8101089938
Curtosis	-1,012545565
Coficiente de asimetría	0,263328701
Rango	294592,7
Mínimo valor por metro cuadrado de construcción	346885,1
Máximo por metro cuadrado de terreno construcción	641477,8
Suma	13263031
NUMERO DE LOTES	28

Tabla 8-14. Comportamiento estadístico para el quinto rango.

Se identifica el porcentaje de cada una de las unidades identificadas para dar cuenta de las unidades cartográficas definidas.

SIGNIFICADO	AREA EN M2	PORCENTAJE
BOSQUE ENANO DE SUBPARAMO	5.912.747,15	17,56372672
BOSQUE FRAGMENTADO	2.431.650,00	7,22317985
CUERPO DE AGUA	29.881,00	0,088761062
ERIAL	353.874,93	1,051180168
EXPLORACION MINERA	47.748,80	0,141837094
FRAILEJONAL Y PAJONAL	5.191.706,23	15,42188549
MATORAL ABIERTO	66.687,74	0,198094935
MATORAL CERRADO	776.788,84	2,307439597
MISC DE CORDONES RIPARIOS LIGERAMENTE FRAGMENTADA	254.770,80	0,756792842
MISC DE CORDONES RIPARIOS MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	1.687.370,80	5,012309653
MISC DE DE PARCHES DE RASTROJO LIGERAMENTE FRAGMENTADA	1.038.891,00	3,086010132
MISC DE DE PARCHES DE RASTROJO MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	2.758.991,00	8,19554138
MISCELANEO DE PARCHES DE MATORRAL INTENSAMENTE FRAGMENTADA	386.104,80	1,146918519
MISCELANEO DE PARCHES DE MATORRAL LIGERAMENTE FRAGMENTADA	138.446,51	0,411253289
MISCELANEO DE PARCHES DE MATORRAL MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	501.167,40	1,488710239
PLANTACION FORESTAL	6.414.076,28	19,05291737
RASTROJO ALTO	503.536,70	1,495748218
RASTROJO BAJO	1.670.749,86	4,962937391
URBANO	2.646.326,20	7,860872279
VEGETACION CASMOFITA	209.531,00	0,622408692
VEGETACION TURBERA	643.489,22	1,911475087
TOTAL GENERAL	33.664.536,26	100

Tabla 8-15. Área de cada una de las unidades identificadas.

Con respecto a la leyenda utilizada para la clasificación de la cobertura actual de la reserva forestal en Bogotá, se logran clasificar los siguientes grupos, de acuerdo al uso del suelo:

- a. Coberturas Naturales Ligeramente Intervenidas
- b. Coberturas Naturales Fuertemente Intervenidas
- c. Plantaciones Forestales
- d. Coberturas de uso Agropecuario

Coberturas Naturales Ligeramente Intervenidas: En este grupo se encuentran las coberturas que llevan a inferir ecosistemas alterados, es decir, sin pérdida significativa de su dinámica. Corresponde a Bosque Enano de Subpáramo (Be), Bosque (B), Bosque Fragmentado (Bf), Frailejón-Pajónal (Pf), Matorrales (Ma, Mc), Pajónal Arbustivo (Pb) Vegetación Casmofita (Vc).

Coberturas Naturales Fuertemente Intervenidas: Corresponde a los tipos de cobertura relacionados con ecosistemas deteriorados, es decir, que por el grado de intervención no son plenamente funcionales. Corresponde a Arbolado Disperso (A), Misceláneo de Parches de Matorral (Zm1, Zm2, Zm3) y cordones riparios (Zq1, Zq2, Zq3).

Plantaciones Forestales: La mayoría de plantaciones son propiedad de particulares, cuya expectativa generalizada ha sido la explotación comercial y sostenible (aprovechamientos persistentes) de sus plantaciones. Dichas plantaciones están conformadas especialmente por Pino Patuca (*Pinus patula*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Ciprés (*Cupressus lusitanica*), Acacia (*Acacia decurrens*).

Según el Estudio POMCO, en el contexto de las condiciones ecológicas de la reserva Forestal Protectora, las plantaciones irrumpen en la dinámica estructural y funcional de los ecosistemas propios, como comunidades homogéneas, con poca oferta de hábitat para la fauna y de enriquecimiento de los demás recursos conexos (aguas, suelos, fauna), considerando que las plantaciones forestales constituyen uno de los tipos relevantes en la cobertura actual de la Reserva, debe considerarse la restauración de estas zonas bajo condiciones específicas de manejo y seguimiento para evitar procesos de restauración no satisfactorios.

Aunque las plantaciones forestales de particulares tienen como objetivo la producción, no han sido objeto de tratamientos silviculturales continuos que conduzcan a los niveles de producción de madera, óptimos para las edades y condiciones de cada especie. Las prácticas silviculturales han obedecido a labores aisladas durante los aprovechamientos forestales.

Dentro de las plantaciones forestales de instituciones, se destaca el proceso dado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado para el reemplazamiento paulatino por vegetación nativa.

Coberturas de Uso Agropecuario: Áreas con usos agropecuarios, que ha perdido su condición de vegetación nativa, pero por la naturaleza del uso (agropecuario), son zonas deterioradas pero susceptibles de ser restauradas. Corresponden a este grupo: Pastizal (P), Pastizal Arbustivo (Pa), Cultivos Transitorios (Ct) y Misceláneo de Cultivos y Rastrojo (Zc).

Definición valuatoria del área ambiental

En primer lugar se desarrollo investigación directa de oferta de predios sobre el área de protección de todos los cerros orientales

a) Precios de oferta y avaluos.

DIRECCIÓN	VR/M2	VR/HA
KR 7 KM 19 CERCA AL PEAJE	3.000,00	30'000.000,00
Parque entre nubes	2.400,00	24'000.000,00
salida a Villavicencio y por la antigua salida de Juan Rey	2.500,00	25'000.000,00
zona protegida arriba del Parque Nacional	5.000,00	50'000.000,00
PROMEDIO	3225	

Tabla 8-16. Precios de oferta y avaluos.

b) ESTIMACIÓN DEL VALOR AMBIENTAL: Tal como lo supone la metodología incorporando el valor social a las coberturas vegetales, tal como se relaciona a continuación.

SIGNIFICADO	AREA EN M2	%	VALOR ECONOMICO (CARACTERISTICAS AGROLÓGICAS-ACCESIBILIDAD-PENDIENTES) (\$/m2)	VALOR SOCIAL DEACUERDO A LA COBERTURA (\$)/m2	VALOR METRO CUADRADO (\$)	TOTAL (\$)
BOSQUE ENANO DE SUBPARAMO	5.912.747,1	17,5	3.200	272	3.472	20.529.058.105
BOSQUE FRAGMENTADO	2.431.650,0	7,22	3.100	264	3.364	8.178.854.775
CUERPO DE AGUA	29.881,00	0,09	6.400	0	6.400	191.238.400
ERIAL	353.874,93	1,05	2.800	70	2.870	1.015.621.049
EXPLOTACION MINERA	47.748,80	0,14	4.900	221	5.121	244.497.730
FRAILEJONAL Y PAJONAL	5.191.706,2	15,4	2.400	204	2.604	13.519.203.023
MATORAL ABIERTO	66.687,74	0,20	3.100	140	3.240	216.034.934
MATORAL CERRADO	776.788,84	2,31	2.700	122	2.822	2.191.709.712
MISCELANEA DE CORDONES RIPARIOS LIGERAMENTE FRAGMENTADA	254.770,80	0,76	1.200	54	1.254	319.482.583
MISCELANEA DE CORDONES RIPARIOS MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	1.687.370,8	5,01	1.000	45	1.045	1.763.302.486
MISCELANEA DE DE PARCHES DE RASTROJO LIGERAMENTE FRAGMENTADA	1.038.891,0	3,09	1.100	50	1.150	1.194.205.205
MISCELANEA DE DE PARCHES DE RASTROJO MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	2.758.991,0	8,20	1.300	59	1.359	3.748.089.274
MISCELANEAELANEO DE PARCHES DE MATORRAL INTENSAMENTE FRAGMENTADA	386.104,80	1,15	1.150	52	1.202	464.001.443
MISCELANEAELANEO DE PARCHES DE MATORRAL LIGERAMENTE FRAGMENTADA	138.446,51	0,41	1.250	56	1.306	180.845.754
MISCELANEAELANEO DE PARCHES DE MATORRAL MEDIANAMENTE FRAGMENTADA	501.167,40	1,49	960	43	1.003	502.771.136
PLANTACION FORESTAL	6.414.076,2	19,0	3.800	27	3.827	24.544.104.293
RASTROJO ALTO	503.536,70	1,50	900	41	941	473.576.266
RASTROJO BAJO	1.670.749,8	4,96	1.050	47	1.097	1.833.230.284
URBANO*						
VEGETACION CASMOFITA	209.531,00	0,62	1.250	31	1.281	268.461.594
VEGETACION TURBERA	643.489,22	1,91	800	20	820	527.661.160
TOTAL GENERAL	33.664.536,	100,				81.905.949.205

* Dato en el estudio del área urbana

Tabla 8-17. Área de cada una de las unidades identificadas.

Estimación del valor de terreno de acuerdo al Decreto 609, tal como se relaciona en la **Tabla 8-18**.

Actividad / Estrato		Con régimen Propiedad Horizontal	Sin régimen Propiedad Horizontal	
		Valor en pesos metro cuadrado de construcción	Valor en pesos por metro cuadrado de terreno	Valor en pesos metro cuadrado de construcción
Urbanizado no edificado	1		\$ 72.000	
Urbanizado no edificado	2		\$ 126.000	
Urbanizado no edificado	3		\$ 210.000	
Urbanizado no edificado	4		\$ 329.000	
Urbanizado no edificado	5		\$ 493.000	
Urbanizado no edificado	6		\$ 716.000	
No Urbanizable		\$ 337.000	\$ 34.000	\$ 107.000
Rural y Expansión Urbana				
Zona	Localidades			
Norte	Chapinero, Suba y Usaquén	\$ 1.098.000	\$ 19.000	\$ 326.000
Occidente	Engativá, Fontibón y Kennedy	\$ 624.000	\$ 12.000	\$ 179.000
Sur y Oriente	Santa Fe, San Cristóbal, Usme, Bosa y Ciudad Bolívar	\$ 445.000	\$1.900	\$ 166.000

Tabla 8-18. FUENTE: SECRETARIA DE HACIENDA DISTRITAL: DECRETO DISTRITAL 609 DE 29 DE DICIEMBRE DE 2006. Por el cual se determina para el año gravable 2007 la base mínima del impuesto predial unificado de los predios a los cuales no se les ha fijado avalúo catastral.

De acuerdo con esta tabla se tendría que los 31.018.210,06 metros cuadrados del área rural de la zona de estudio, corresponderían al valor catastral de **\$58.934'599.114,00 (cincuenta y ocho mil novecientos treinta y cuatro millones quinientos noventa y nueve mil ciento catorce pesos)** es decir el 71,95% del valor comercial.

8.3.3 Pérdidas económicas comercio y cobertura

Para la evaluación y valoración de las pérdidas económicas, generadas en los contenidos de las edificaciones que cuentan con tipo de uso comercial, por causa

de una inundación, se necesita información primaria y secundaria del área de estudio. En lo que respecta a la información secundaria, se contaba con las fichas catastrales de la zona de estudio, en estas fichas se discrimina cada lote por su uso comercial. Sin embargo, mediante un trabajo de campo se pudo comprobar que la información catastral estaba desactualizada.

Para contar con una información verídica y de primera mano, se llevó a cabo un trabajo de campo que consistió en el levantamiento visual de todos y cada uno de los negocios de la zona.

Para ordenar la información recopilada, se establecieron 21 tipos de las actividades económicas que se llevan a cabo en cada predio.

La inspección consistió en la tipificación del predio dependiendo de la actividad desarrollada y la toma de datos del área del negocio.



Fotografía 8 - 8.



Fotografía 8 - 9.



Fotografía 8 - 10.



Fotografía 8 - 11.

Para establecer el precio de las mercancías, mobiliario y demás elementos que hacen posible el desarrollo de determinada actividad económica, se utilizó la base

datos de la Cámara de Comercio de Bogotá, identificando unidades de negocio con características similares a las que se presentan en la zona de estudio, mediante la identificación del código CIU (descripción de la actividad económica) de la entidad y realizando el trabajo de campo respectivo para tomar los datos complementarios de los negocios tipo.

IDENTIFICADOR	DIRECCIÓN	NOMBRE COMÚN	CÓDIGO CIU	COSTO REGISTRADO	ÁREA DEL NEGOCIO (m ²)	COSTO NEGOCIO/M ²
1	Cll 24 No 16-32	Cafetería, cigarrería	G521100 G521900 H552200	4700000	32	146875
2	Crr 85 j No 64B -15	panadería	G51110	3600000	80	450000
3	Av 1 de mayo No 25-39	Distribuidora de alimentos	G512500 G521902	107125642	60	1785427
5		Miscelanea		35000000	30	166000
6		Vivieres, frutas y verduras	G522100	15000000	80	187500
7	Av Cali No 15ª-22	Carnicería	G522300	15978000	64	249663
8	Cll 16s No 17-21	Droguería	G523100	5000000	36	138888
10		Ferretería	G524100	220000000	250	880000
11	Crr 27 No 16-51s	Taller automotor	G505100 G503000 G502000	561368700	600	1935615
12	Cll 16 No 15-01	Repuestos motocicletas	G504000	19000000	35	542857
13	Crr 12 No 18-52	Restaurante	H552100	34274000	300	114249
14		Comunicaciones		3800000	20	253333
15-19	Av Boyacá No 76-16	Empresa		400000000	189	2116402
16		Pinturas		20000000	20	1000000
17		Peluquería		9500000	30	316666
18		Estación de servicio		200000000	1600	125000
21	Cll51 No 87j-18	Supermercado		25000000	40	625000

Tabla 8-19. Identificadores, según CCB.

Lo anterior, se debe a la dificultad de obtener la información del valor económico de los negocios directamente de los dueños o administradores de estos.

Una vez recopilada la información de campo de la zona, se procedió a establecer el costo por unidad de área de los negocios tipo y se extrapolaron los resultados para los negocios de la zona de estudio, utilizando el software ArcGIS.

La zona urbana dentro del área de estudio cuenta con 220 establecimientos comerciales, ubicados en la primera planta de las viviendas, en un arreglo que sigue la calle 11 sur, por ser esta la vía de mayor tránsito de la zona.

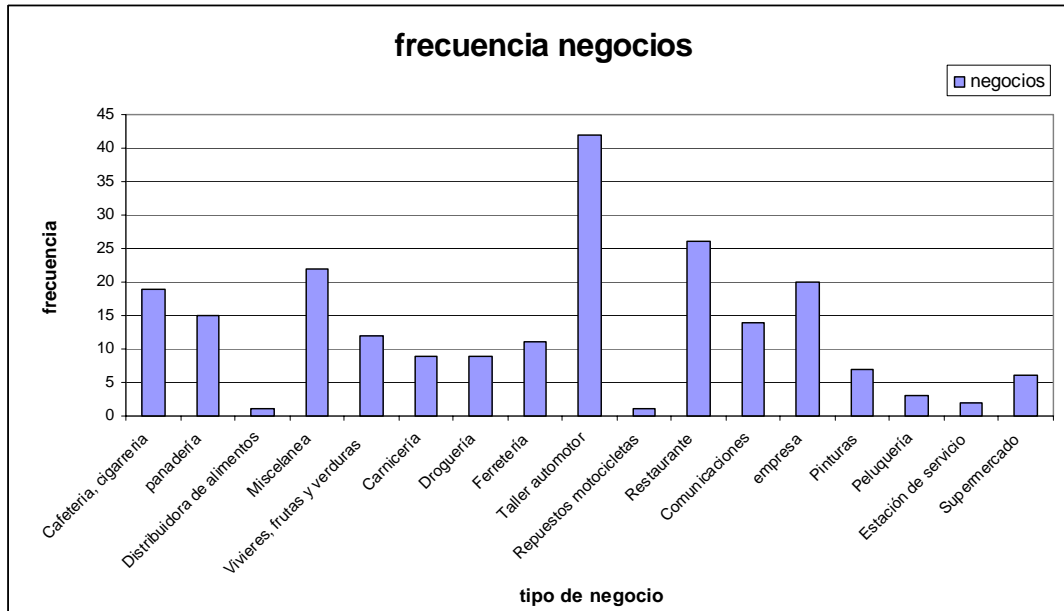


Figura 8-9. Distribución de los negocios en la Zona de estudio.

El análisis de la información tanto del mapa de ubicación como de la estadística, muestra dos características importantes. Primero, en la parte baja de la zona de estudio (cerca de la carrera 10ª), los negocios del tipo talleres automotores presentan la mayor frecuencia, esto implica un elevado número de vehículos de la zona y de áreas cercanas que hacen uso del servicio, a su vez generando demanda de los bienes y servicios de los negocios cercanos. En segundo lugar para la zona alta (entre carrera 6ª Este y 8ª Este), se presenta la mayor y más diversa concentración de negocios productores de artículos de primera necesidad, esto puede ser por la mayor concentración de población en esta zona.

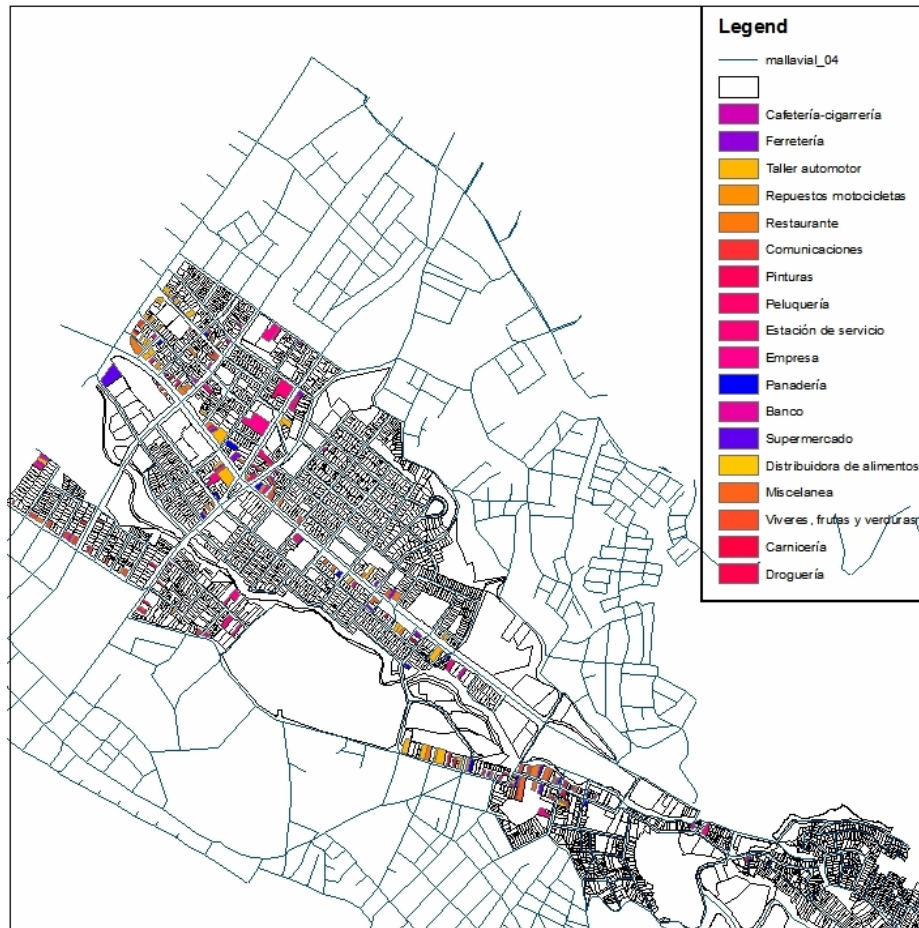


Figura 8-10. Distribución de los negocios en la Zona de estudio.

Para la zona rural, se llevo a cabo la valoración económica de los 10 tipos de cobertura caracterizados en este estudio, utilizando la información de cobertura y correlacionando los valores de los diferentes tipos de cobertura.

El valor máximo posible de las pérdidas económicas de todos los predios comerciales es de aproximadamente ciento veintidós mil millones de pesos. Los costos exactos de las pérdidas del sector comercial y de uso de suelo, se presenta en la Tabla 8-20.

Costo negocios	\$ 25675'280177.9
Costo cobertura	\$ 95894'738556.4
COSTO TOTAL	\$ 121.570'018.734.3

Tabla 8-20. Costo de pérdidas en el sector comercial, en pesos colombianos.

8.4 Estimación del riesgo económico

Con base en los valores de amenaza, vulnerabilidad y costos por predio se estimó el riesgo para cada predio por escenario y la suma de estos nos da el riesgo total de cada escenario. La distribución espacial del riesgo se observa en los mapas de riesgo del Anexo-E1, de estos se puede observar qué sectores dentro de la zona serán más afectados desde el punto de vista costo.

Se puede observar que las principales pérdidas se presentarán a lo largo del cauce de la Quebrada San Cristóbal, esto se debe a que las áreas afectadas allí son cuantificadas como predios rurales que valen más que los urbanos. En la zona semi-urbana y urbana se observa que los principales daños se presentan en la parte alta de las cuencas de las quebradas La Pichosa, El Triángulo y Ramajal. Esto indica que las estrategias de mitigación del riesgo se deben focalizar hacia esa zona.

En el caso de la quebrada Vitelma se observa que en el potencial caso de que obstruya la tubería se pueden presentar pérdidas importantes en la parte baja de la cuenca.

Debido a que no hay una categorización en relación con los niveles de riesgo económico significativos, los valores utilizados para generar los mapas no permiten comparar los diferentes parámetros, por lo tanto el análisis se hace con base en los valores de riesgo total calculado.

En la Figura 8-11 se presenta los resultados de riesgo económico para la condición de inundación sin sedimentos. De ella se observa que no existen diferencias significativas entre los valores de riesgo para los diferentes parámetros hidráulicos utilizados para estimar el riesgo. Si es claro que las mayores pérdidas se presentan a lo largo de la quebrada San Cristóbal por verse afectados predios rurales. En las cuencas de las quebradas Ramajal, La Pichosa y El Triángulo las mayores pérdidas también son en los predios rurales. En los predios urbanizados, las mayores pérdidas se pueden esperar en las quebradas Ramajal, La Pichosa y Vitelma.

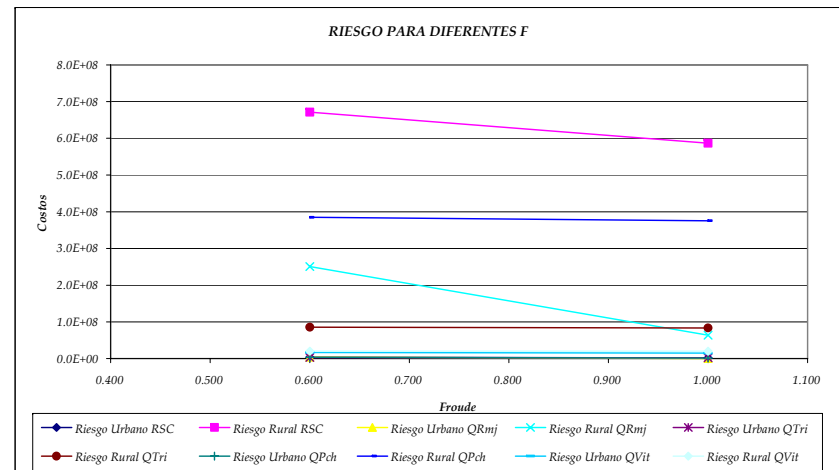
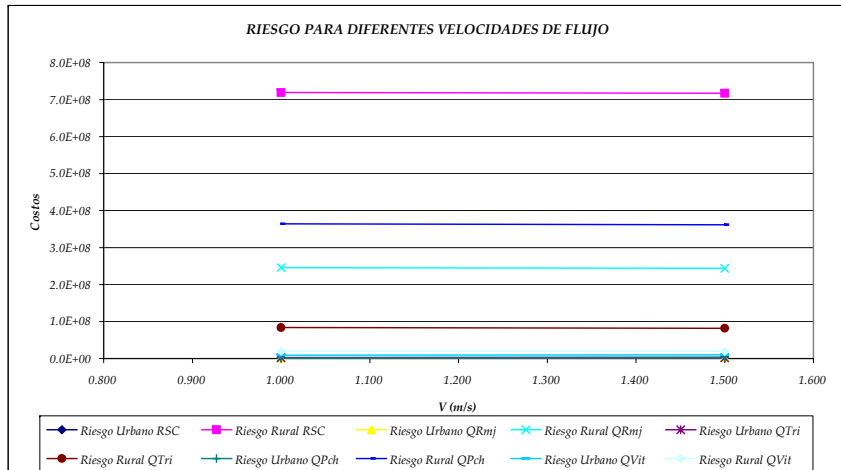
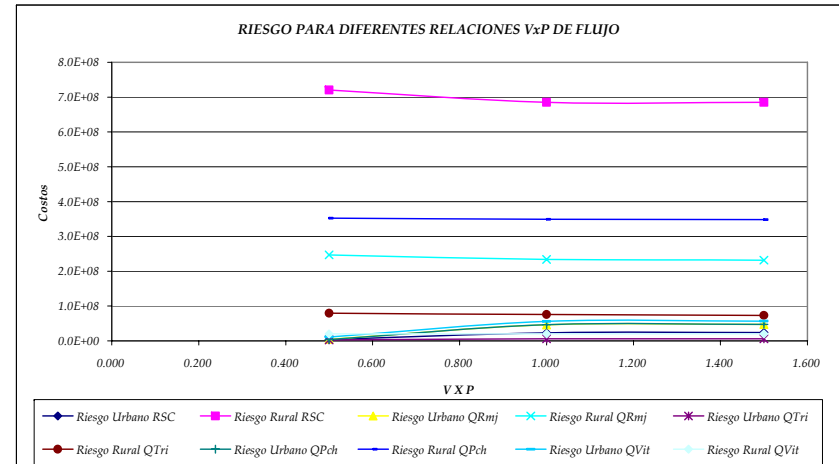
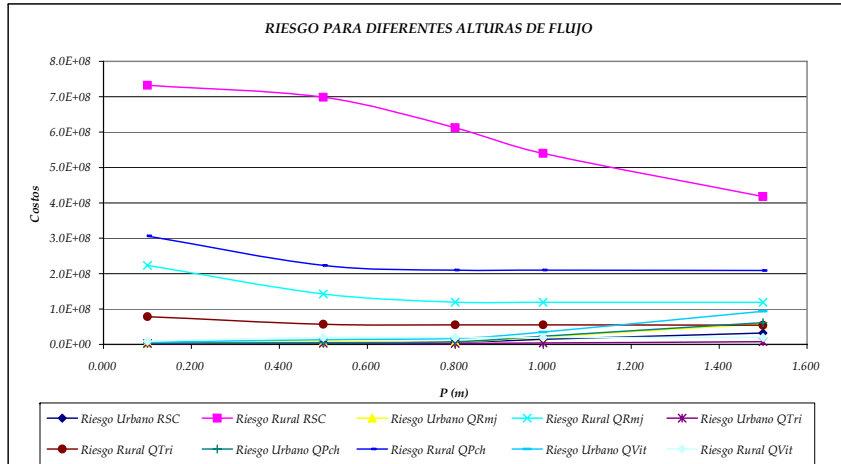


Figura 8-11. Riesgo económico asociado con inundaciones.

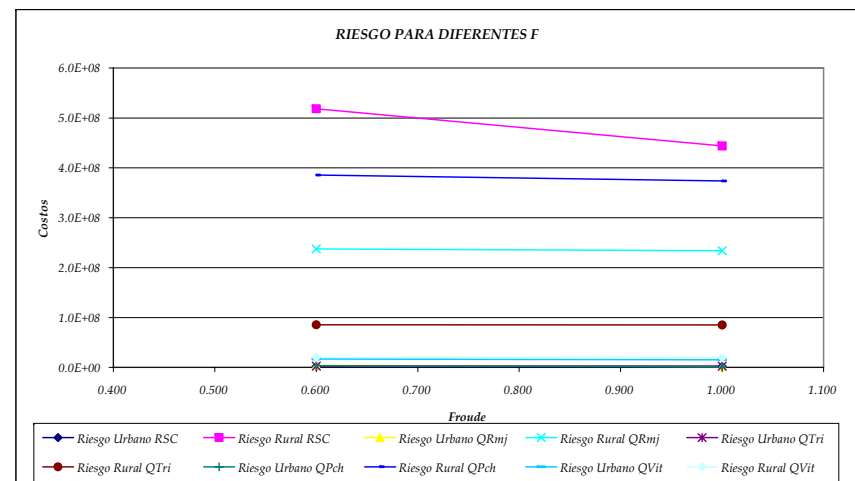
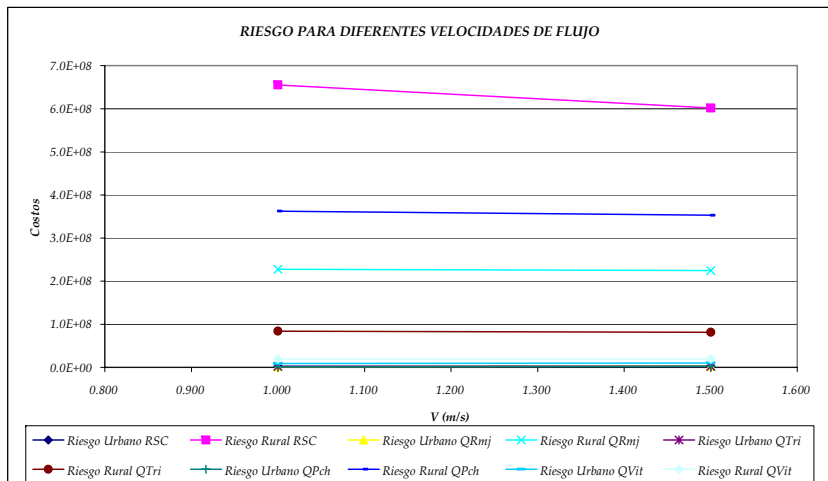
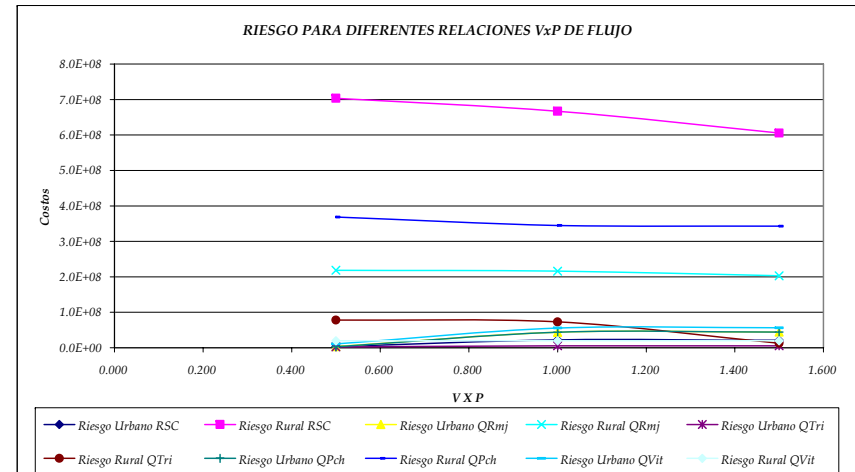
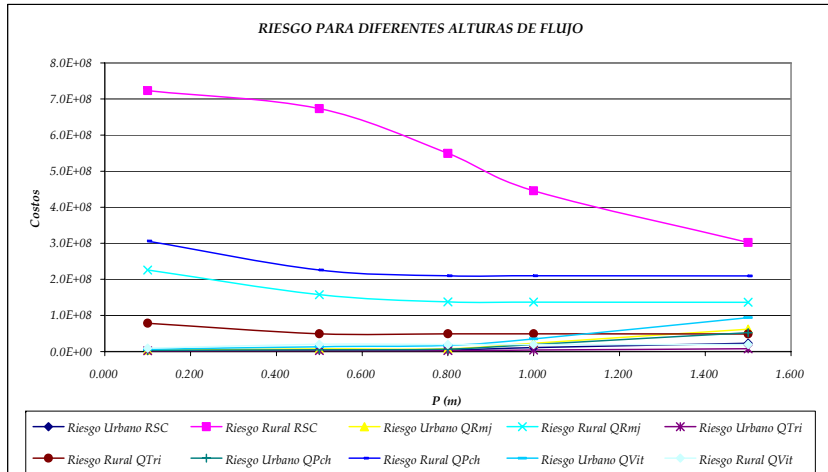


Figura 8-12. Riesgo económico asociado con flujos incluyendo los sedimentos por los diferentes procesos estudiados en la cuenca.

La Figura 8-12 muestra que no existen diferencias significativas en los resultados de riesgo por las inundaciones y los proceso de flujo con sedimentos. Esto se debe a que la concentración de sedimento no es significativa como para cambiar el tipo de flujo que se presenta.

Debido que los predios se valorizan con el tiempo a una tasa definida por el IVIUR (Índice de Valoración Inmobiliaria Urbana), el valor futuro para los años durante el periodo de diseño se estima como:

$$VF = VP \times \left(1 + \frac{IVIUR}{100} \right)^n$$

donde, VF es el valor futuro del inmueble, VP es el valor presente, n año en que se quiere estimar el valor, con la aplicación de esta relación se obtiene un valor de riesgo proyectado anual como se muestra en la Figura 8-12. Con base en el Decreto 610 de 2006 de la Alcaldía de Bogotá el IVIUR en el año 2007 (año cero) para inmueble residencial Tipo 1 (tipo de residencia típica de la zona), es de 5.9%.

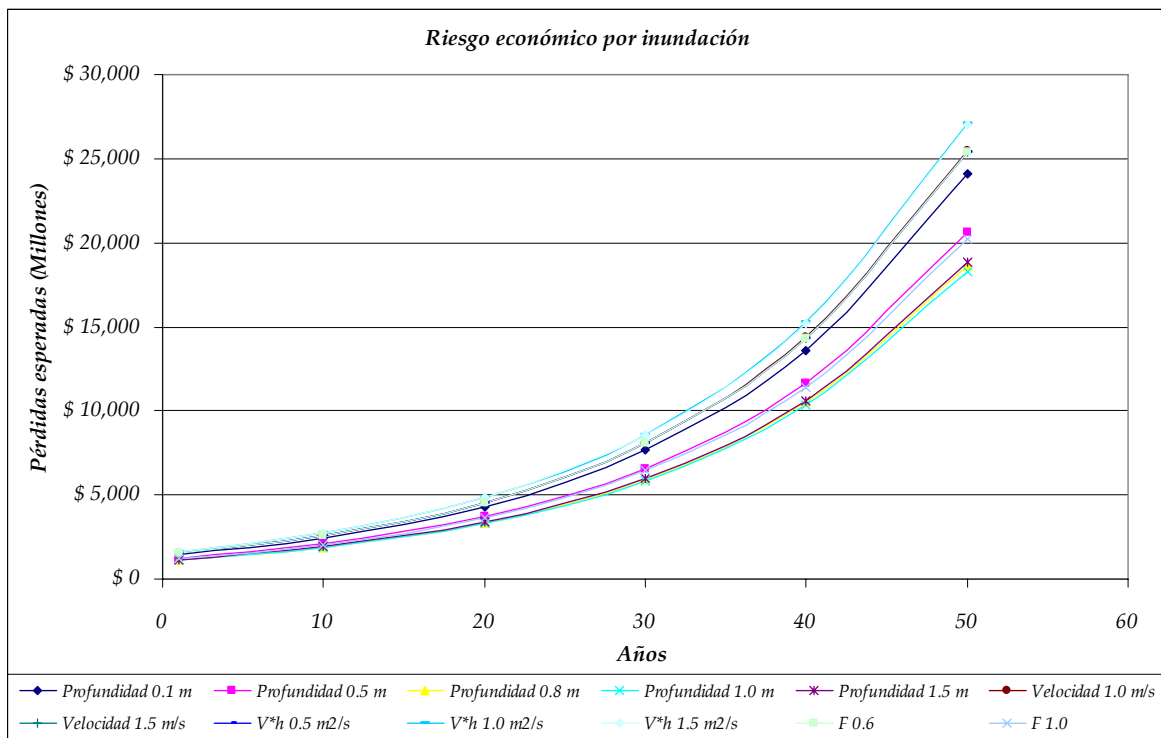


Figura 8-13. Riesgo económico por inundaciones para los diferentes años durante el tiempo de diseño.

En la Figura 8-13 se observa que las diferencias entre los diferentes parámetros no son significativas para periodos cortos, sin embargo debido a que la función de valorización es exponencial para grandes periodos se incrementa significativamente. De los diferentes parámetros el que mayor nivel de pérdidas dio, para la zona de estudio fue el caudal unitario, mientras que las profundidades dieron menores valores.

La Figura 8-14. muestra la variación del riesgo con el tiempo para el caso en que se incluyen los sedimentos producidos en la cuenca. Al igual que en los casos anteriores los resultados son similares porque la diferencia en concentración no es significativa.

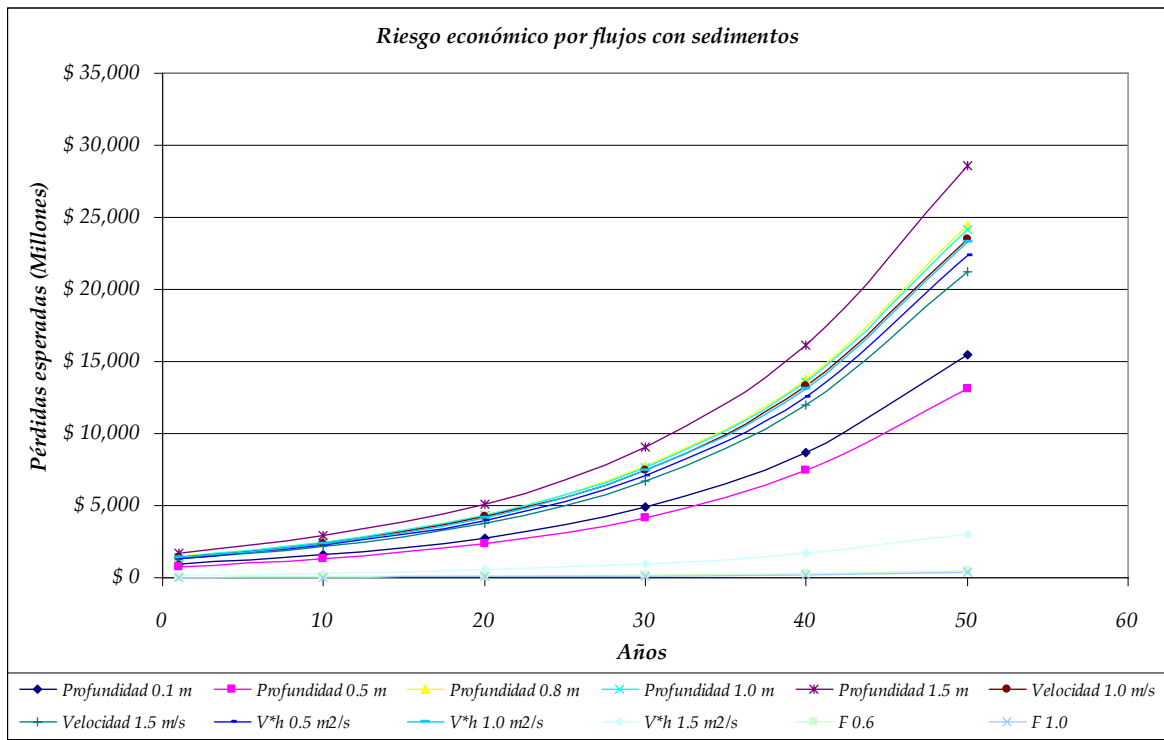


Figura 8-14. Riesgo económico por inundaciones para los diferentes años durante el tiempo de diseño.

Con el fin de analizar la reducción del riesgo por la implementación de diferentes estrategias de mitigación en las cuencas de las quebradas La Pichosa y El Triángulo y San Cristóbal, se estimó el costo aproximado de las diferentes estrategias.

La Pichosa

Considerando la alternativa de canalización, el costo estimado de esta obra sería de \$1.300.000.000, costo definido de manera aproximada considerando un canal trapezoidal de 2.0m de altura. Adicionalmente se sumo al costo de la canalización el de compra de predios que propone el estudio de Gómez Cajiao, debido a que la reubicación de los predios debe hacerse en todo caso. El costo actualizado de los predios es de \$ 3.795.713.958. Por último al costo de la canalización se le sumo un 5% del costo anual para considerar un costo por mantenimiento del canal.

Para determinar la relación Beneficio/Costo, asumiendo que la inversión se hace en el año 1, el costo de la obra se difiere a lo largo del periodo de vida (50 años) con base en la siguiente expresión:

$$VA = \frac{P_0}{(1+T)^1} + \frac{P_0}{(1+T)^2} + \frac{P_0}{(1+T)^3} + \dots + \frac{P_0}{(1+T)^n} = P_0 \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1+T)^k}$$

Donde VA es el Valor Actual, que en nuestro caso es el valor presente de la obra. P_0 es valor postpagado de amortización, esto es el valor que le corresponde a cada año, del costo total de inversión inicial.

De lo que se trata es tomar el costo de inversión y diferirlo en un periodo n de años. Si la tasa de amortización es cero P_0 debería ser el costo inicial dividido el número de años, pero como es variable se debe aplicar la formula para calcular el valor futuro de cada pago parcial.

La Figura 8-15 presente la proyección a lo largo de la vida útil de la inversión y los beneficios, considerando los beneficios la reducción del riesgo por la construcción de la obra.

La relación Beneficio/Costo (B/C) se estimó como:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Riesgo} - \text{Costo}}{\text{Costo}}$$

La Figura 8-15 muestra esta relación para la canalización de la quebrada La Pichosa, mientras que la Figura 8-16 presenta la relación B/C para las medidas propuestas por Gómez Cajiao para esta misma quebrada. Para este caso se actualizo el costo de la solución incrementando los costos a una tasa de 5.9% anual, obteniéndose un monto total de \$ 8.551.467.222.

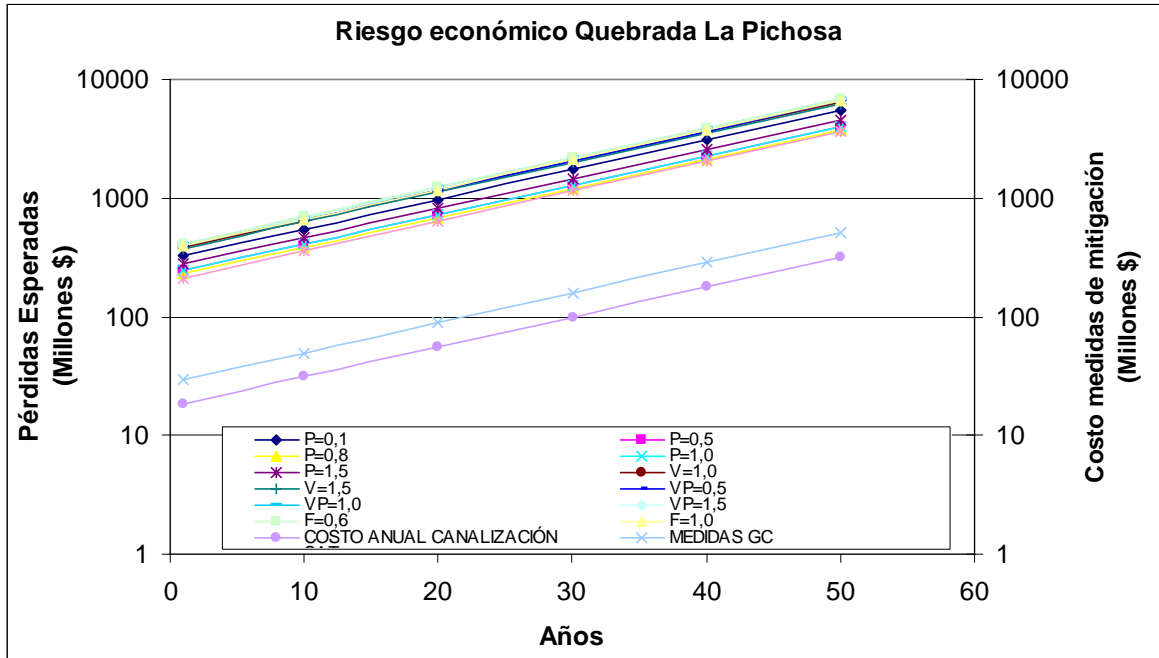


Figura 8-15. Proyección del riesgo económico y de las medidas de mitigación consideradas para la quebrada La Pichosa.

De estas gráficas se puede concluir que las dos alternativas de mitigación son económicamente viables para reducir las pérdidas económicas en la quebrada La Pichosa. De las dos se observa que la canalización es la que genera mayor relación B/C, sin embargo la canalización presenta el inconveniente de que en la parte baja de esta quebrada se presenta un deslizamiento de gran magnitud y activo que no garantiza la durabilidad de la obra.

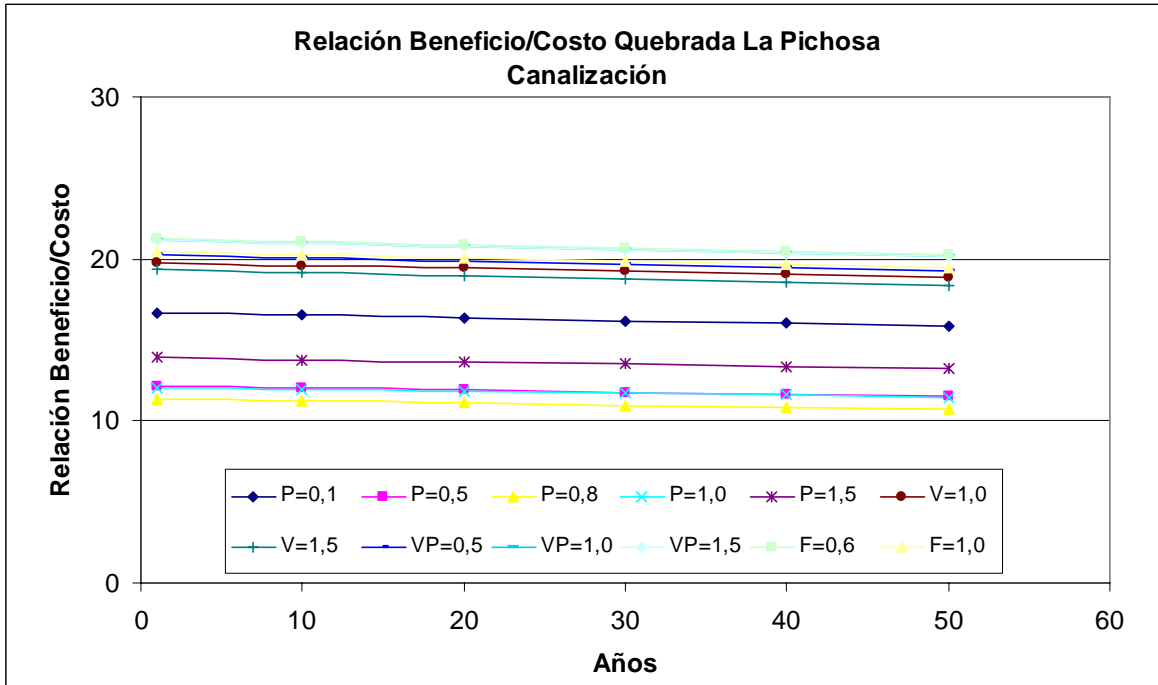


Figura 8-16. Relación Beneficio/costo para la canalización de la quebrada La Pichosa.

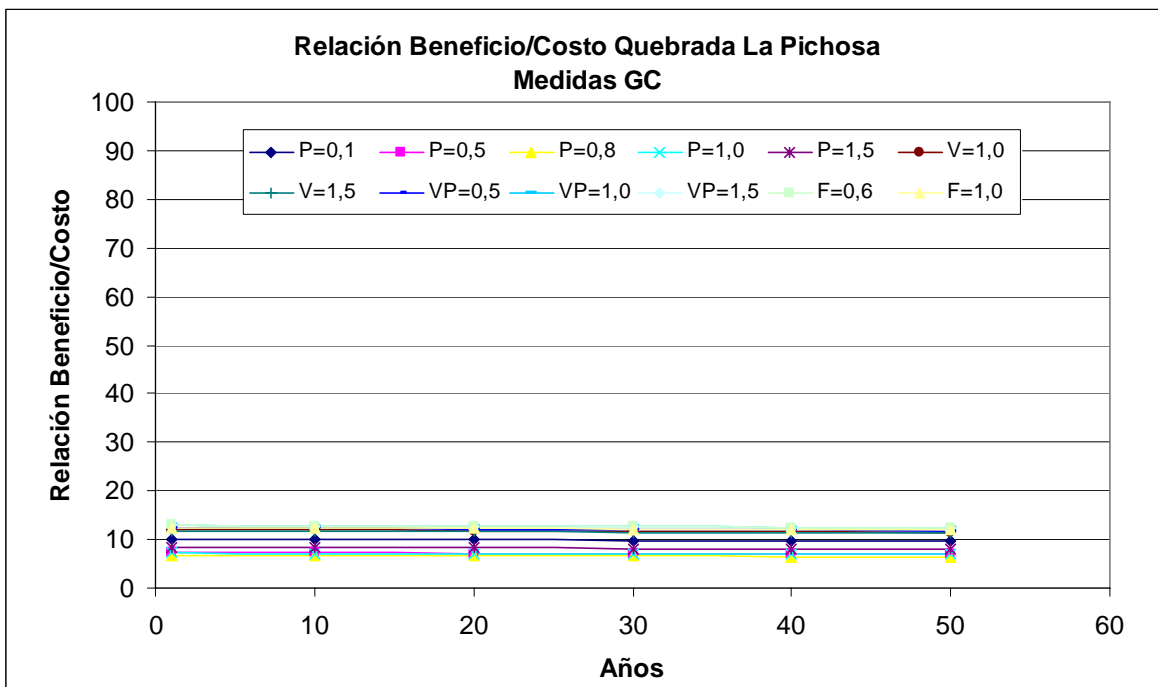


Figura 8-17. Relación Beneficio/costo para las obras propuestas por Gómez Cajiao en la quebrada La Pichosa.

El Triángulo

Para el caso de la quebrada El Triángulo se hizo el análisis considerando una canalización para la cual se estimó una inversión de \$ 800.000.000. En la Figura 8-18 se muestra la comparación del costo anual por estas obras con el riego económico anual. Por su parte en la Figura 8-19 se presenta la relación B/C para esta solución. Una ventaja de la canalización de esta quebrada es la reducción de los niveles a la entrega en la quebrada San Cristóbal, con la consecuente reducción de las pérdidas potenciales hacia aguas debajo de esta entrega.

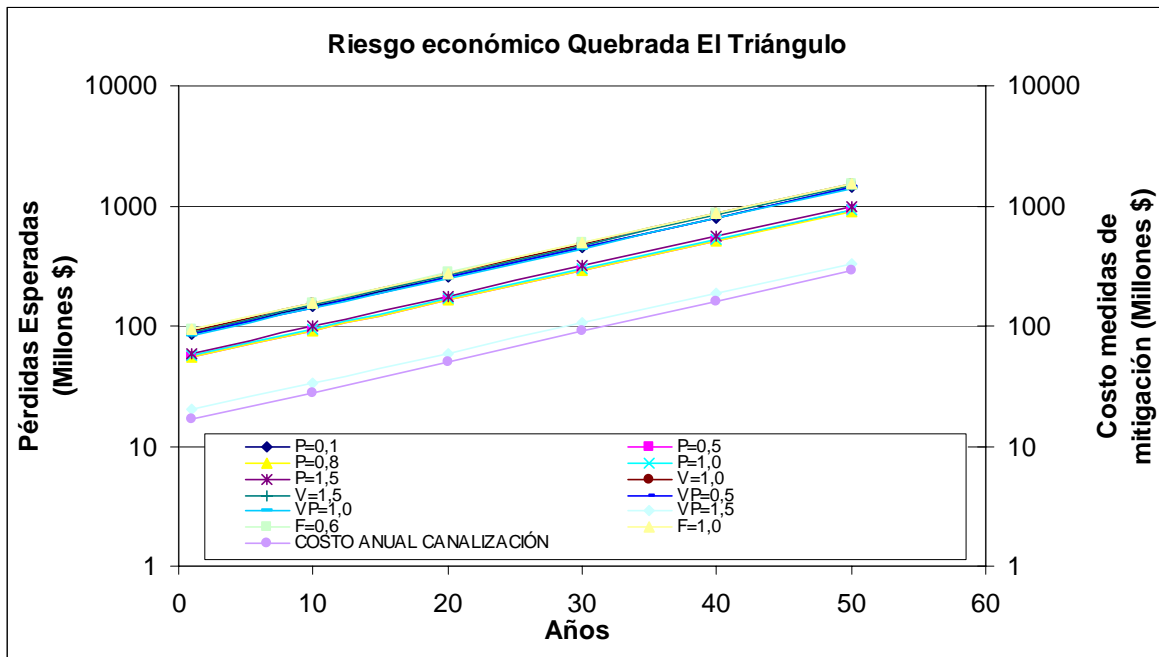


Figura 8-18. Comparación de costos de mitigación contra las pérdidas esperadas en la Quebrada El Triángulo.

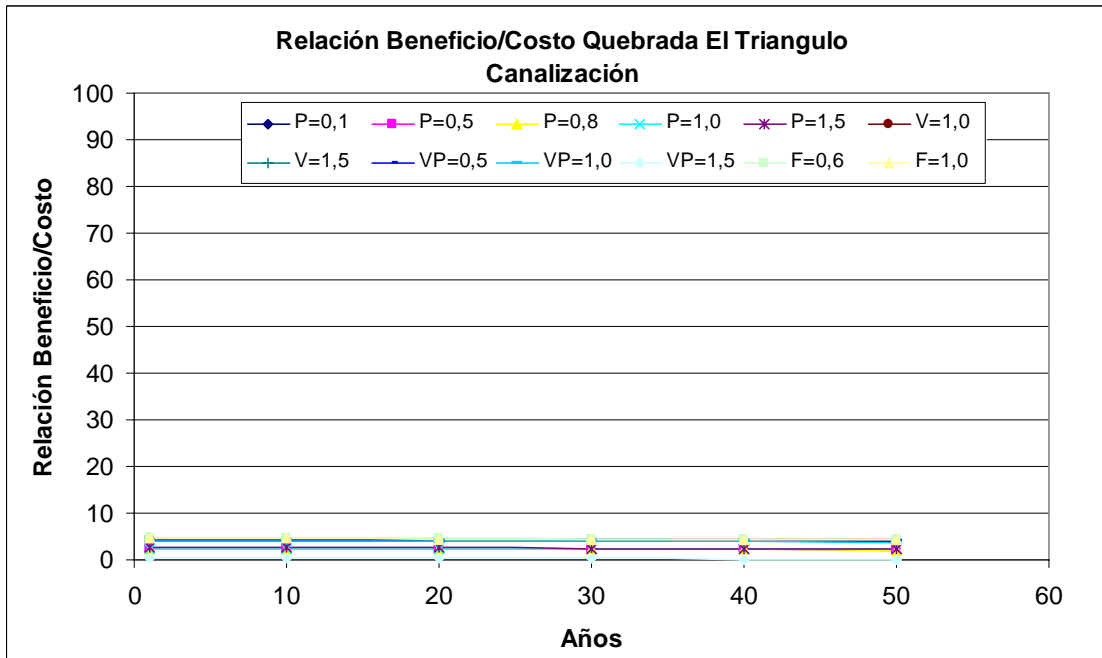


Figura 8-19. Relación Beneficio/costo para diferentes estrategias de mitigación del riesgo de la quebrada El Triángulo.

8.5 Estimación del riesgo social

Con base en los resultados de amenaza y el número de personas expuestas en las zonas afectadas por los flujos se estimó el número de personas potencialmente afectadas. La Figura 8-209 muestra la el número de personas potencialmente expuestas para los diferentes parámetros hidráulicos en el escenario de flujos de agua sin sedimentos.

La Figura 8-209 muestra un número de personas expuestas demasiado alto. Esto se debe a que la información del censo no es confiable. Los datos de población no están definidos por predio sino por unidad territorial que no está claramente definida, tomando los datos y promediando para determinar número de personas por predio se obtienen valores demasiado altos. Con los datos disponibles se encuentra un número de personas potencialmente afectas entre 1900 y 3200, lo que es exagerado viendo la poca área que es afectada por las inundaciones.

Se debe resaltar que el número de afectados en la zona de la quebrada Vitelma se eleva significativamente con relación a los anteriores debido a que en caso que se presente un taponamiento de la tubería la extensión de la inundación sería muy grande. Esto implica que se requiere garantizar el óptimo funcionamiento de la tubería para evitar elevadas consecuencias tanto económicas como sociales.

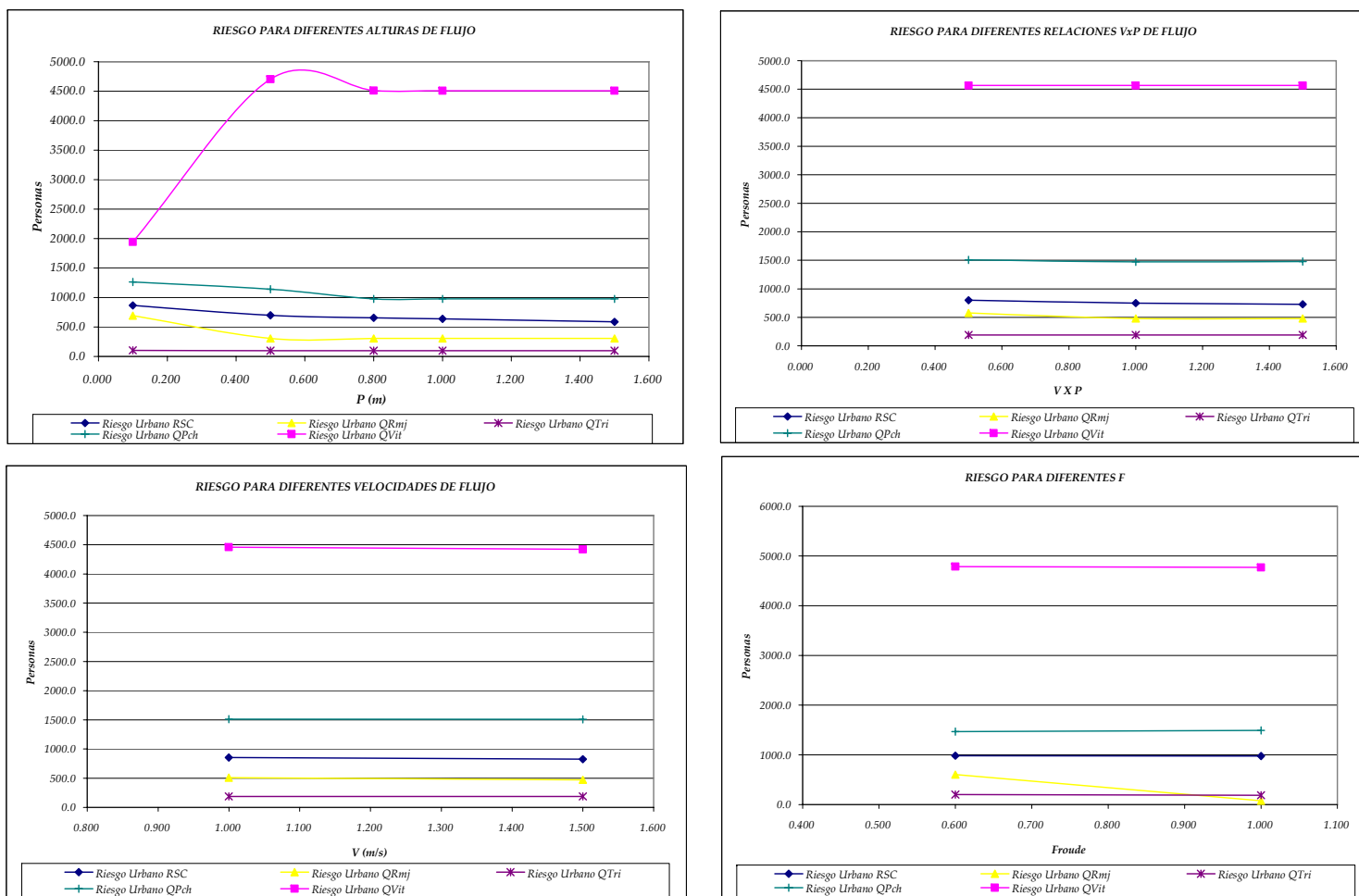


Figura 8-20. Personas potencialmente afectas por inundaciones en la cuenca de la Quebrada San Cristóbal.

Cuando se aplicó la ecuación propuesta para la estimación del riesgo social se identificaron predios con un número de personas expuestas superiores a 30, lo cual no es lógico, ni por la densidad de población real ni por los niveles de amenaza obtenidos en este trabajo. Para la definición de las estrategias de mitigación, en el Capítulo 9 se hace una identificación de los predios donde se puede presentar afectación de personas.

En la Figura 8-21 se muestran las mismas gráficas que las de la Figura 8-20, pero incluyendo los sedimentos producidos por los diferentes procesos en la cuenca. Al igual que en los demás análisis hechos, no se observan diferencias significativas.

Para los datos disponibles el análisis de riesgo bajo la condición de agua sin sedimentos y con todos los sedimentos producidos por la cuenca se obtienen el número esperado de personas afectadas anualmente, como se presenta en la Tabla 8-21, es claro que estas cifras sobreestiman el riesgo social.

RIESGO SOCIAL												
Cauce	P=0,1	P=0,5	P=0,8	P=1,0	P=1,5	V=1,0	V=1,5	VP=0,5	VP=1,0	VP=1,5	F=0,6	F=1,0
RSC	0	6.278	29.403	57.384	264.410	76.607	371.069	38.881	67.193	522.287	88.433	440.279
QRmj	0	1.726	8.630	17.261	86.305	28.621	132.247	16.113	26.757	214.056	33.708	21.812
Qtri	0	0.888	4.443	8.887	44.436	17.064	85.323	8.532	17.064	136.517	18.308	85.323
QPch	0	8.388	36.402	72.805	364.561	113.392	561.769	56.380	110.230	899.795	109.372	553.637
QVit	0	19.221	92.444	184.876	924.380	186.060	924.631	187.445	936.977	1499.164	478.873	983.742

RIESGO SOCIAL AGUA MÁS SEDIMENTOS												
Cauce	P=0,1	P=0,5	P=0,8	P=1,0	P=1,5	V=1,0	V=1,5	VP=0,5	VP=1,0	VP=1,5	F=0,6	F=1,0
RSC	0	3.309	29.978	60.078	268.939	84.915	370.921	41.461	81.625	719.511	76.030	311.607

Tabla 8-21. Número esperado personas afectadas para los diferentes parámetros de análisis.

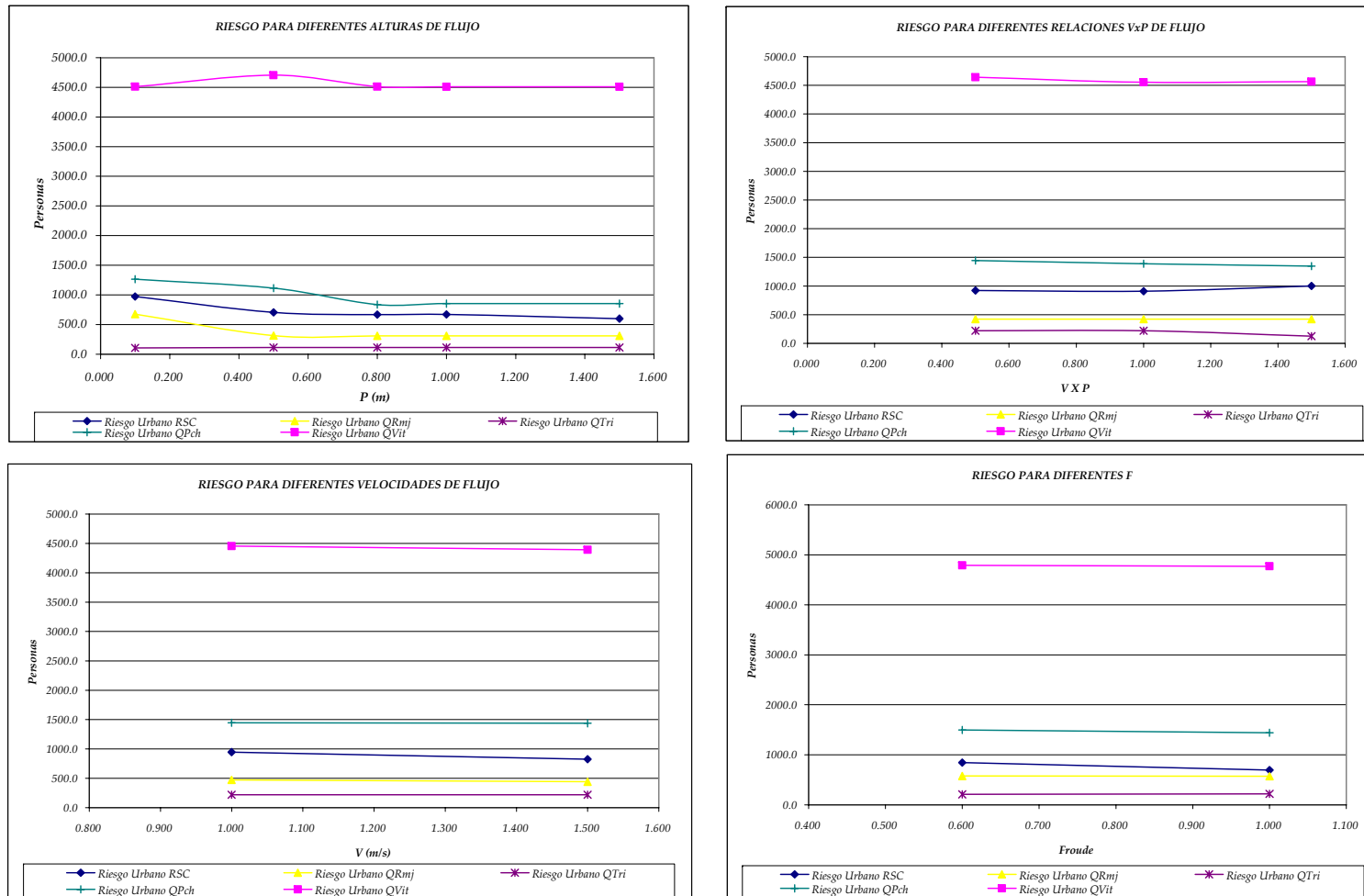


Figura 8-21. Personas potencialmente afectas por flujos en la cuenca de la Quebrada San Cristóbal.

CAPITULO 9

ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN

En este capítulo se identifican las estrategias a implementar para la mitigación del riesgo por inundaciones y flujos en la parte alta de la cuenca del Río San Cristóbal. Las políticas generales que se han adoptado usualmente a nivel internacional, nacional y distrital se resumen en el Anexo F-1. En los siguientes numerales se describen las acciones particulares recomendadas para la zona de estudio. Inicialmente se plantea la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) como primera etapa de acciones a aplicar en particular para generar alertas en las quebradas La Pichosa, El Triangulo y la parte baja del Río San Cristóbal. Posteriormente se hace un análisis de los diferentes sectores dentro de la cuenca con base en los mapas de inundación, amenaza y riesgo con el fin de definir las medidas estructurales y no estructurales requeridas.

9.1 Sistemas de alerta temprana (SAT) contra inundaciones

9.1.1 Introducción

Cuando se estudia la historia de los recientes desastres naturales, tales como, terremotos, erupciones o las típicas inundaciones que se generan en épocas de lluvias como las que actualmente han ocurrido en la zona norte y oriental del país, es decepcionante observar las cifras relacionadas con pérdidas humanas y económicas que éstos han producido; aún más, cuando gran parte de estas pérdidas son resultado de la falta de conciencia de las comunidades más vulnerables ante la eventualidad de un desastre y por ende la ausencia casi total de preparación encaminada a la reducción del impacto que tales desastres podían generar.

Ante esta situación, las instituciones de protección civil han enfocado su gestión entorno a la reducción de desastres mediante la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – SAT.

En el marco conceptual asociado a la temática de desastres se definen los riesgos como la combinación de amenazas y vulnerabilidades sociales. Las amenazas se clasifican en naturales, como en el caso de terremotos y huracanes; socio – naturales como en el caso de deslizamientos fomentados por la tala indiscriminada; y las antropogénicas, que son generadas por el hombre. De esta forma es posible separar las razones / impactos relacionados con las amenazas, como los terremotos y huracanes, de las responsabilidades sociales relacionadas

con técnicas de construcción, uso de suelos y otros factores de tipo social que se agrupan bajo la vulnerabilidad.

Tomando estas generalidades es posible conceptualizar el riesgo como un proceso que se genera mediante la construcción de entornos sociales vulnerables a lo largo de muchos años, en zonas en donde se manifiestan amenazas de distintos tipos. Como es de esperarse el resultado de este proceso es el *Desastre*, el cual ocurre cuando la amenaza se torna en evento de proporciones que ocasiona daños en el entorno social.

En este contexto, la *Prevención* se define como el conjunto de medidas que se adoptan para reducir o minimizar la exposición a amenazas naturales. Obras tales como presas para controlar el flujo de agua son un ejemplo de *Prevención*. En contraste la *Mitigación* enfoca el conjunto de medidas que se adoptan para reducir la vulnerabilidad. La implementación de códigos y normas de construcción son ejemplos de *Mitigación* (Figura 9-1.).

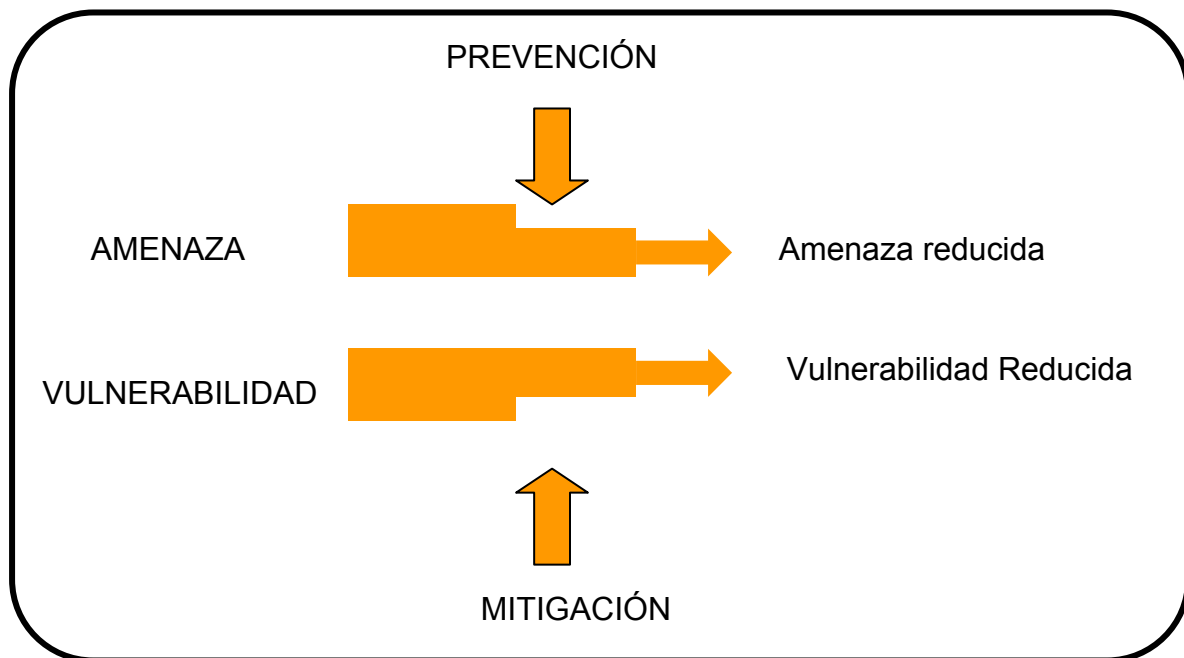


Figura 9-1. La amenaza y la vulnerabilidad se reducen mediante medidas de Prevención y Mitigación, respectivamente.

Aunque las medidas de Prevención y Mitigación son útiles para reducir los riesgos, existen procesos para los cuales no existen medidas de prevención simples. En

estos casos, se hace necesario preparar y organizar a la población de manera que pueda minimizar los daños causados por dichos eventos. En este caso hablamos de medidas diseñadas en el contexto de la *Preparación*.

Bajo este marco conceptual el riesgo se puede definir de la siguiente manera:

Riesgo = Amenaza x Vulnerabilidad x Deficiencias en Preparación

Como se observa, el *Riesgo* aumenta conforme aumentan las *Amenazas* y las *Vulnerabilidades* y en la medida en la cual la población no cuenta con una *Preparación* apropiada para afrontar los eventos cuando se manifiestan. Sin embargo, el *Riesgo* se puede disminuir implementando medidas para preparar a la población hacia la respuesta adecuada ante la eventualidad de un desastre natural (Figura 9-2).

En esta definición las actividades de Preparación enfocan el conjunto de medidas que se toman antes y durante un proceso natural, que tienen como objetivo reducir el impacto. Los *Sistemas de Alerta Temprana (SAT)* en caso de eventos de distinta naturaleza (inundaciones, sequías, huracanes, etc.) son un ejemplo típico de medidas de este tipo, que tienen como objetivo el alertar a los miembros de las comunidades sobre la ocurrencia de posibles eventos catastróficos y facilitar la implementación de acciones conducentes a reducir las pérdidas económicas y sociales.

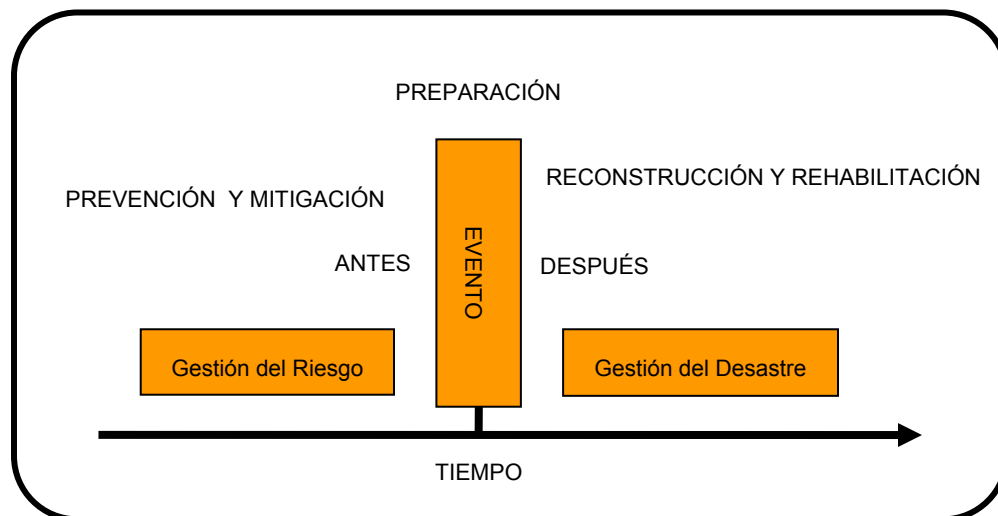


Figura 9-2. El marco temporal de las gestiones de riesgo y desastre. La preparación comprende el conjunto de medidas que se implementan para minimizar los daños causados por el evento natural mientras ocurre.

A continuación se describen los elementos y actividades más importantes que deben ser tenidas en cuenta en la implementación de un SAT, estos conceptos se elaboraron a través de la revisión exhaustiva de documentos sobre el tema, en particular los producidos por la Naciones Unidas, los documentos base de este análisis son los siguientes:

1. Cardona Arboleda O.D. (1991). Sistemas de alerta para la prevención de desastres. Colombia.
2. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2001). Inestabilidad de laderas. Secretaría de Gobernación. México.
3. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (2002). Informes Técnicos: Sistemas de Alerta Hidrometeorológica en Acapulco, Tijuana, Motozintla, Tapachula y Monterrey. Coordinaciones de Investigación e Instrumentación. México.
4. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2002). Diagnóstico situacional de las comunidades aledañas al cerro Tapezco: Proyecto Sistema de Alerta Temprana en el cerro Tapezco. San José, Costa Rica.
5. Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) (1995). Guía operacional del sistema de alerta de inundaciones – Cuenca del Río Leán. Tegucigalpa, Honduras.
6. Defensa Civil. Programa de Organización Barrial ante Emergencias ALERTA. (1999). Meteorología: Fenómenos naturales. Argentina.
7. Dirección Nacional de Protección Civil. Sistema de Alerta Temprana. Ministerio del Interior. República Argentina.
8. EWC III. Tercera Conferencia Internacional Sobre Alerta Temprana. (2006). Desarrollo de sistemas de alerta temprana: Listas de comprobación. Bonn, Alemania. Disponible en Internet <http://www.unisdr.org/ppew/info-resources/ewc3/checklist/Spanish.pdf>
9. Glowacki D.W. (1995). Preventing flood damage through the use of automated flood warning systems and floodproofing of structures. Madison, USA.
10. Hamilton R. (1997). Report on early warning capabilities for geological hazards. Geneva.

11. Laporte Molina G., Sáenz Aguilar S. (1992) Estudio geotécnico: propuestas para reducción del riesgo y sistema de control. San José; costa Rica.
12. OEA. Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; Gobierno de Irlanda. (2001). Manual para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana de inundaciones en cuencas menores. Washington, D.C.
13. Protti M. (1999). Alerta temprana a San José por un debajo de la península de Nicoya. San José, Costa Rica.
14. Reid B. (2006). Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. UN-ISDR Plattform for the Promotion of Early Warning (PPEW). Bonn, Germany.
15. Rivera J.A. Utilización de sistemas de alarmas y comunicaciones en emergencias: Guía del Líder comunitario. Tolima, Colombia.
16. Roca Salazar R., Fernández Ríos D., Gutiérrez Guillén R. (2003). Sistema de Alerta Temprana contra las crecidas del Río Grande (SALTEM-RG). La Paz, Bolivia.
17. Salgado D. (2002). Problemática de la cuenca del río Reventado Cartago: Los aspectos de ocupación en área de amenaza natural múltiple y los conflictos del uso del suelo en áreas con regulaciones preventivas. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. San José; Costa Rica.
18. Villagrán de León J. C. La alerta temprana en el contexto de las poblaciones rurales, contrastes entre las erupciones y las inundaciones en Guatemala. Guatemala.
19. Villagrán de León J.C. SATs Sistemas de alerta temprana para emergencia de inundaciones en Centroamérica. Panamá.
20. Villagrán de León J.C. Sistemas de alerta temprana operados por comunidades en América Central. Guatemala. Disponible en Internet <http://www.unisdr.org/ppew/info-resources/ewc3/checklist/Spanish.pdf>
21. Villagrán de León J. C. (2001). Sistema comunitario de alerta temprana para inundaciones: Proyecto MARLAH: Cara Sucia, Ahuachapán, El salvador. El Salvador.
22. Villagrán de León J.C., Scott J., Cárdenas C., Stacey T. (2003). Sistema de Alerta Temprana en el hemisferio americano: Contexto, Estado actual y Perspectivas futuras. Antigua, GT.

9.1.2 Definición

La alerta temprana es uno de los principales elementos de la reducción del riesgo de desastres. La misma evita la pérdida de vidas y disminuye los impactos económicos y materiales de los desastres. Para ser eficaces, los sistemas de alerta temprana deben incluir activamente a las comunidades en riesgo, facilitar la educación y la concientización del público sobre tales riesgos, diseminar eficazmente mensajes y alertas y garantizar una preparación constante. (Figura 9-3).

El termino “Alerta Temprana” es usado en muchos campos, principalmente en el suministro de información en circunstancias de emergencia, en donde dicha información puede posibilitar acciones en el desarrollo de la reducción del riesgo. Tales Sistemas de Alerta pueden involucrar varios campos del conocimiento e incluir distintos tipos de amenaza, desde el punto de vista social, ambiental, político, financiero, etc.

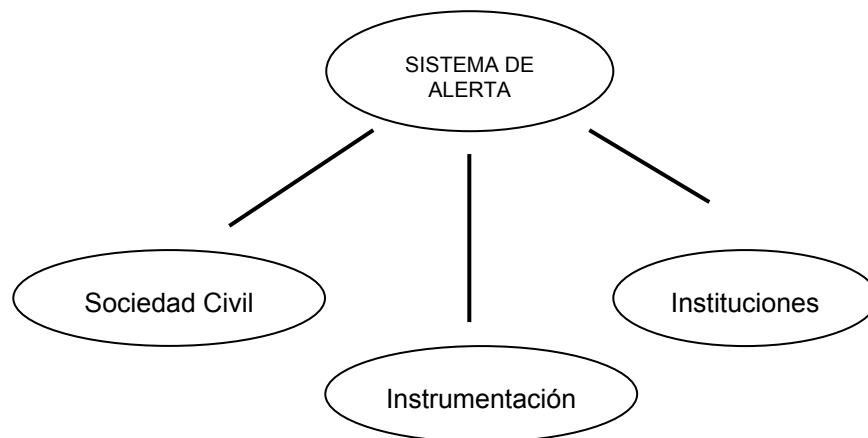


Figura 9-3. Componentes del SAT.

En este contexto se entiende por SAT a una estructura operativa organizada, que comprende las actividades de monitoreo de las amenazas, pronóstico de eventos,

alerta y respuesta¹. La Figura 9-4. representa el esquema operativo de un Sistema de Alerta Temprana, de acuerdo con la anterior definición.

El monitoreo es realizado de manera permanente, para dar seguimiento a los eventos y su evolución. La alerta consiste en informar a la población acerca del estado de los procesos de manera coordinada por los comités locales y medios masivos de comunicación. Finalmente, las autoridades locales coordinan las actividades de respuesta en caso de desastres.

Otra definición apropiada, es la que presenta la actual terminología de la UN – ISDR, en la cual la alerta temprana es definida como “El suministro oportuno y efectivo de información, a través de instituciones establecidas, que permiten a los individuos expuestos tomar acciones para evitar o reducir el riesgo y prepararse para una respuesta efectiva” (ISDR 2004).

Cualquier sistema de este tipo debe satisfacer el principio operativo de brindar una alerta con suficiente anticipación para que la población pueda tomar precauciones en relación al evento que se aproxima. Para que los SAT que se implementen tengan éxito, es imperativo que se apoyen en estructuras operativas de respuesta eficiente.

En varias observaciones y evaluaciones de SAT implementados a lo largo del mundo, se ha podido concluir que la puesta en marcha de dichos sistemas ha brindado una oportunidad para introducir conceptos relacionados con riesgos y manejo de desastres. Los talleres que acompañan la implementación de Sistemas de Alerta Temprana usualmente los presentan en el contexto de la gestión del riesgo y propician la divulgación de estos conceptos y modelos en áreas propensas a desastres, especialmente en comunidades en zonas de alta exposición.

¹ Villagrán de León, J.C. SATs Sistemas de Alerta Temprana para Inundaciones en Centroamérica. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia UNICEF; Centro de Coordinación Para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central CEPREDENAC. Panamá.

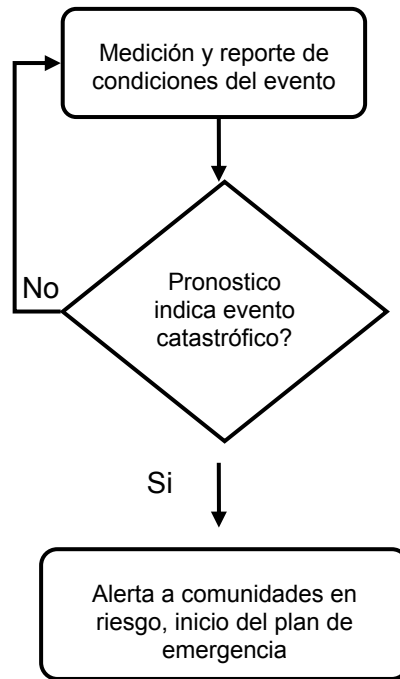


Figura 9-4. Esquema operativo del SAT.

9.1.3 Objetivos

El objetivo principal de un Sistema de Alerta Temprana, es informar de manera oportuna y efectiva a la población expuesta mediante procedimientos y mecanismos previamente establecidos en caso de un evento natural de proporciones tales que pueda causar daño, con el fin de que ésta tome medidas tendientes a evitar o reducir el riesgo y se prepare para una respuesta efectiva.

La difusión de la alerta tiene como objetivo final la ejecución de actividades de preparación y tendientes a la movilización de estructuras locales y población en general. En el caso de estructuras locales, las alertas inician la ejecución de los planes de emergencia que involucran actividades tales como búsqueda y rescate, montaje, y operación de albergues y actividades de coordinación general. En el caso de la población, las alertas tienen como objetivo despertar una respuesta eficiente que involucre evacuación o medidas de protección.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos en la implementación de un Sistema de Alerta Temprana podemos mencionar:

- Establecer un proceso sistemático y uniformizado para recopilar, evaluar y compartir información, mapas y tendencias en cuanto a las amenazas y vulnerabilidades.
- Establecer un servicio eficaz de seguimiento y alerta de amenazas con una sólida base científica y tecnológica.
- Desarrollar sistemas de comunicación y difusión para advertir de antemano a las personas y comunidades de una amenaza natural inminente y facilitar la coordinación y el intercambio de información en los ámbitos nacional y regional.
- Fortalecer la capacidad de las comunidades para responder a los desastres naturales mediante una mejor educación sobre los riesgos producto de las amenazas naturales, la participación de las comunidades y la preparación en desastres.
- Desarrollar marcos institucionales, legislativos y en el ámbito de las políticas para apoyar la implementación y el mantenimiento de sistemas eficaces de alerta temprana.

9.1.4 Tipos de SAT

En la actualidad a nivel mundial las Instituciones Nacionales de Protección Civil operan Sistemas Nacionales de Alerta en caso de eventos de gran magnitud, tales como huracanes. En estos sistemas la entidad nacional de meteorología lleva a cabo el monitoreo de la evolución del evento y recomienda a la institución nacional la emisión de alertas para las regiones del país que la seguirán. Con esta información, la institución nacional emite un comunicado de prensa alertando a la población, para lo cual convoca a los medios masivos de prensa, radio y televisión.

En contraste a los sistemas nacionales, en muchos países en vía de desarrollo se han implementado sistemas comunitarios o locales de alerta temprana, que son operados por voluntarios radicados en distintos sectores de la cuenca.

En la mayoría de los casos, estos sistemas han sido implementados mediante el apoyo de ONGs y entidades internacionales dedicadas a la prevención de desastres. Estos sistemas que son más elementales se han insertado en las

instituciones nacionales de protección civil vía proyectos, y en la actualidad dichos sistemas son sostenidos por estas instituciones nacionales.

Basados en estas estructuras y según la instrumentación y los distintos actores involucrados en el proceso, podemos distinguir dos tipos de sistemas en función de la participación; *Nacionales o Centralizados y Descentralizados o Comunitarios.*

Sistemas de alerta temprana centralizados

La característica principal de estos sistemas es la instrumentación sofisticada en todas las etapas del proceso. En forma telemétrica se utiliza un equipo de medición automático conectado a un sistema de radiocomunicación. Las condiciones hidrometeorológicas son monitoreadas en tiempo real y son transmitidas automáticamente a un centro de pronóstico, con el fin de ser analizadas en cualquier momento. Se utilizan dispositivos electrónicos para el monitoreo de la precipitación y nivel de río y se modelan situaciones en tiempo real utilizando modelos hidrológicos computarizados y sensores remotos. Estos sistemas están encontrando aplicación en cuencas grandes y se apoyan en la defensa nacional civil o en organizaciones de protección para responder en caso de inundación.

Algunos otros tipos de sistemas utilizan satélites para la obtención de información que luego es procesada para hacer los pronósticos correspondientes. Los huracanes son el ejemplo tradicional de SAT con base en satélites; para incendios forestales y El Niño se está usando esta alta tecnología.

Entre las ventajas de este tipo de sistemas están:

- Dichos sistemas permiten a los hidrólogos y personal técnico - científico un monitoreo constante y de alta resolución, lo que hace posible la generación de mejores pronósticos (más exactitud en el nivel de inundación esperado).
- Dichos sistemas se han construido con la capacidad de ser soportados por telefonía común, telefonía celular, por medio de radiocomunicación y vía satélite. Adicionalmente, la mayoría mantiene un servidor en INTERNET que permite a cualquier usuario acceder a la información sobre las estaciones operacionales desde cualquier sitio, lo que hace posible una mayor difusión de la información a personas e instituciones con accesibilidad a este servicio, tales como medios masivos de difusión.
- Las comunidades que se encuentran en constante peligro de inundación, han incrementado su capacidad de respuesta en 3 – 4 horas convirtiéndose en una herramienta invaluable de respuesta.

- La información recopilada es almacenada para recuperación y análisis tales como magnitud o frecuencia de eventos.

Algunos aspectos relevantes con respecto a este tipo de sistemas y que pueden tener injerencia en su implementación son:

- Se requiere de un programa de mantenimiento preventivo y de recursos, tanto materiales, como humanos, para su operación rutinaria.
- Lo costoso de la instrumentación debe inducir a las autoridades nacionales a asignar una partida para mantener la red en operación, lo que debe incluir en todo caso tanto la reparación, como el reemplazo por daños y desperfectos mayores.
- Estos sistemas requieren personal capacitado a un mayor nivel, con conocimientos de informática suficientes para operar programas de cómputo especializados, INTERNET y mantener la información en línea en páginas tipo Web de carácter institucional.

Sistemas de alerta temprana comunitarios

En contraste a la forma sofisticada de los SAT centralizados, varios científicos e hidrólogos han diseñado una forma mas simple de monitoreo hidrometeorológico, donde los miembros de las comunidades participan directamente en las actividades de monitoreo usando técnicas elementales. En este caso los operadores de las estaciones reportan vía radio la información sobre lluvias y nivel de río a un centro local de pronóstico, donde se analizan los datos usando rutinas simples. Los sistemas comunitarios de alerta temprana utilizan esta forma simple de monitoreo.

Aunque estos sistemas carecen de la precisión que se logra con los sistemas telemétricos para la emisión de pronósticos, su bajo costo y la comunicación social que ofrecen favorece su aplicación en cuencas menores y zonas remotas.

Entre las mayores ventajas aportadas por los SAT comunitarios se mencionan las siguientes:

- Dichos sistemas ayudan a las entidades nacionales de protección civil a crear conciencia entre las poblaciones rurales en riesgo sobre las necesidades de iniciar actividades en el tema de reducción de desastres naturales.

- Dichos sistemas operados especialmente en áreas remotas, incorporan una red de comunicaciones vía radio que permite a los miembros de las comunidades intercambiar información de carácter social o legal, además de la información hidrometeorológica.
- Dichos sistemas tienen un costo de operación muy reducido, ya que el equipo de monitoreo es muy simple y el sistema es operado por un conjunto de voluntarios en forma permanente.
- Las redes de radio local contribuyen a instituciones de defensa civil a localizar epicentros de terremotos y los impactos de otros eventos tales como erupciones volcánicas. A este respecto, el hecho de que la transmisión de radio es llevada a cabo por personas, ofrece grandes ventajas en relación con la información que puede ser transmitida por sistemas telemétricos, donde la unidad de radio sólo puede transmitir uno o unos cuantos parámetros climatológicos.
- Estos sistemas, “hechos a la medida” tomando en cuenta las condiciones sociales y culturales de la población local, han sido aceptados de buena gana y operados efectivamente por miembros de la comunidad.

Una desventaja innata de este sistema es su dependencia a la voluntad y capacidad de los pobladores a la toma de datos; sin embargo, la experiencia muestra que el espíritu de colaboración está presente en casos excepcionales. Otra deficiencia importante del sistema, es la inexactitud en los datos tomados por los pobladores; sin embargo, ésta puede ser corregida mediante la densificación de estaciones de medición. De igual forma ésta es compensada por la practicidad de la observación en cualquier momento y desde la comunidad de una vivienda.

En general, todas las deficiencias de operación pueden ser corregidas mediante una organización eficiente de la comunidad y la elección de voluntarios comprometidos con su labor.

9.1.5 Estructura de un SAT

Un sistema completo y eficaz de alerta temprana comprende cuatro elementos interrelacionados como se muestra en la Figura 9-5, que van desde el conocimiento de los riesgos y las vulnerabilidades hasta la preparación y la capacidad de respuesta. Los sistemas de alerta basados en las mejores prácticas también establecen sólidos vínculos internos y ofrecen canales eficaces de comunicación entre todos estos elementos.

Aunque parece que estos cuatro elementos tienen una secuencia lógica, en realidad cada elemento está directamente relacionado e interactúa con cada uno de los demás elementos (doble vía).

El segundo elemento, el seguimiento y alerta, es la parte más reconocida de un SAT, pero la experiencia ha demostrado que la alta calidad técnica de las predicciones por sí misma no es suficiente para lograr la reducción deseada de pérdidas e impactos. Las deficiencias de los SAT comúnmente ocurren en los elementos de preparación y comunicación.

Además de estos cuatro elementos, existen diversos temas transversales que son esenciales para el desarrollo y la sostenibilidad de los sistemas eficaces de alerta temprana. Entre ellos se incluye una gobernabilidad adecuada y arreglos institucionales, un enfoque de amenazas múltiples para alerta temprana, la participación de las comunidades locales y la consideración de la perspectiva de género y de la diversidad cultural. También, deben ser incluidos los principales actores que participan en las actividades de alerta temprana, así como sus funciones y responsabilidades, a fin de enmarcarlos en un contexto específico.

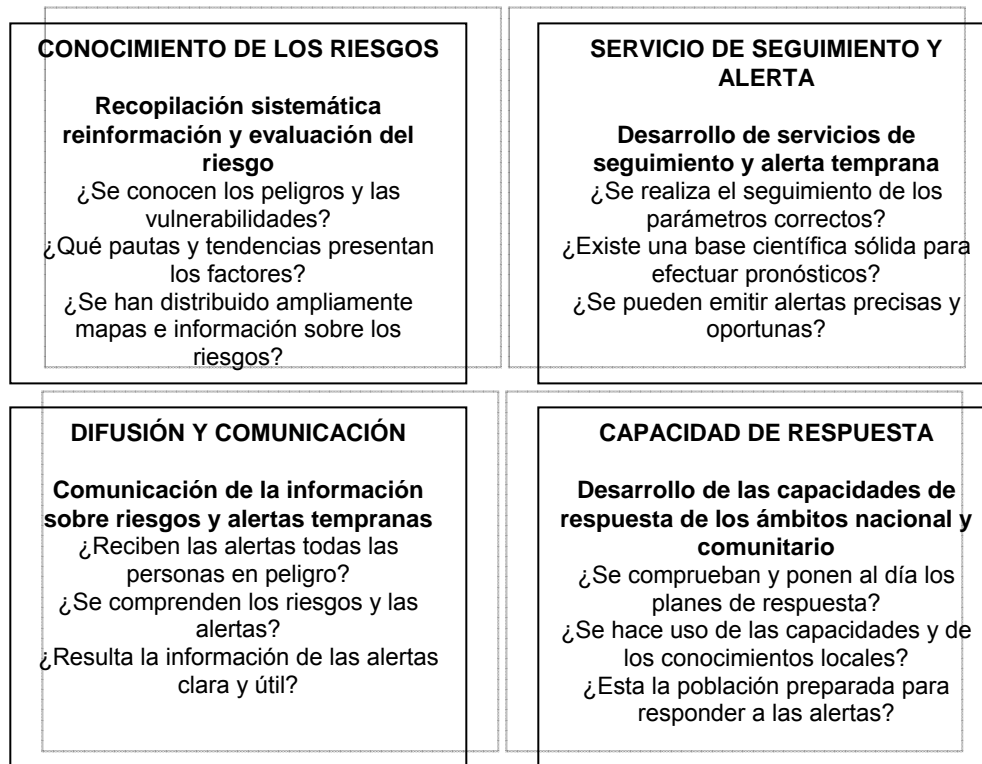


Figura 9-5. Cuatro elementos principales de los Sistemas de Alerta temprana

Elementos principales

Conocimiento de los riesgos

La evaluación de los riesgos requiere de la recopilación y de análisis sistemáticos de información y debe tener en cuenta el carácter dinámico de las amenazas y vulnerabilidades que generan procesos tales como la urbanización, cambios en el uso de la tierra en zonas rurales, la degradación del medio ambiente y el cambio climático. Las evaluaciones y los mapas de riesgo ayudan a motivar a la población, establecen prioridades para las necesidades de los sistemas de alerta temprana y sirven de guía para los preparativos de prevención de desastres y respuesta ante los mismos.

El conocimiento de los riesgos debe incluir los siguientes temas:

- Arreglos organizativos establecidos
- Identificación de amenazas naturales
- Análisis de la vulnerabilidad en las comunidades
- Evaluación del riesgo

Servicio de seguimiento y alerta

Los servicios de alerta constituyen el componente fundamental del sistema. Es necesario contar con una base científica sólida para prever y prevenir amenazas y con un sistema fiable de pronósticos y alerta que funcione las 24 horas del día. Un seguimiento continuo de los parámetros y los aspectos que antecedieron las amenazas es indispensable para elaborar alertas precisas y oportunas. Los servicios de alerta para las distintas amenazas deben coordinarse en la medida de lo posible para aprovechar las redes comunes institucionales, de procedimientos y de comunicaciones.

En el caso de los SAT contra inundaciones (Centralizados o Comunitarios), el monitoreo de las condiciones se basa principalmente en la medición de precipitaciones y niveles de los ríos. A continuación, se hace una explicación detallada de sus componentes y funcionamiento.

El funcionamiento eficaz del seguimiento y alerta se basa en los siguientes temas:

- Establecimiento de mecanismos institucionales
- Desarrollo de sistemas de seguimiento
- Establecimiento de sistemas de pronósticos y alerta

Difusión y comunicación

Las alertas deben llegar a las personas en peligro. Para generar respuestas adecuadas que ayuden a salvar vidas y medios de sustento se requieren de mensajes claros que ofrezcan información sencilla y útil. Es necesario definir previamente los sistemas de comunicación en los planos regional, nacional y local y designar portavoces autorizados. El empleo de múltiples canales de comunicación es indispensable para garantizar que la alerta llegue al mayor número posible de personas, para evitar que cualquiera de los canales falle y para reforzar el mensaje de alerta.

La difusión y comunicación debe cumplir con:

- Institucionalización de procesos organizativos y de toma de decisiones
- Instalación de sistemas y equipos eficaces de comunicación
- Reconocimiento y comprensión de los mensajes

Capacidad de respuesta

Es de suma importancia que las comunidades comprendan el riesgo que corren, respeten el servicio de alerta y sepan cómo reaccionar. Al respecto, los programas de educación y preparación desempeñan un papel esencial. Asimismo, es indispensable que existan planes de gestión de desastres que hayan sido objeto de prácticas y sometidos a prueba. La población debe estar muy bien informada sobre las opciones en cuanto a una conducta segura, las rutas de escape existentes y la mejor forma de evitar daños y pérdidas de bienes.

Una capacidad de respuesta eficaz se basa en:

- Respeto a las alertas
- Elaboración de planes de preparación y respuesta en casos de desastres
- Evaluación y fortalecimiento de las capacidades de respuesta de la comunidad
- Incremento de la concientización y la educación públicas

La UN – ISDR (2006) ha establecido listas de verificación para cada uno de los cuatro elementos de alerta temprana. Cada una de ellas se agrupa bajo una serie de temas principales e incluyen una lista de acciones o pasos, cuya ejecución permitirá establecer una base sólida para crear o evaluar un Sistema de Alerta Temprana. Ver Anexo F-2.

Aspectos transversales

Al momento de diseñar y mantener sistemas eficaces de alerta temprana, es necesario tomar en consideración una serie de aspectos de índole general.

Gobernabilidad y arreglos institucionales eficaces

Una gobernabilidad y acuerdos institucionales muy bien establecidos contribuyen al exitoso desarrollo y a la sostenibilidad de sistemas sólidos de alerta temprana. Estos elementos constituyen la base en la que se fundan, refuerzan y se mantienen los ya mencionados cuatro elementos de la alerta temprana. Un sólido marco jurídico y reglamentario estimula la gobernabilidad, la cual también se refuerza a través del compromiso político a largo plazo y arreglos institucionales eficaces. Las medidas efectivas de la gobernabilidad, a su vez, deberán fomentar

la toma de decisiones y la participación en el ámbito local, con el apoyo de mayores competencias administrativas y recursos en el plano nacional o regional.

También es necesario establecer coordinación y comunicaciones verticales y horizontales entre los actores participantes en la alerta temprana.

Para apoyar la implementación y el mantenimiento de un SAT se debe:

- Adoptar la alerta temprana como prioridad nacional y local a largo plazo.
- Establecer marcos jurídicos y políticos para promover la alerta temprana
- Evaluar y mejorar las capacidades institucionales
- Garantizar los recursos financieros

Enfoque de amenazas múltiples

En la medida de lo posible, los sistemas de alerta temprana deberán establecer vínculos entre todos los sistemas para diversas amenazas. Si se afianzan tanto los sistemas como las actividades operativas en un marco de múltiples propósitos que tenga en cuenta todas las amenazas y las necesidades de los usuarios finales, se podrán obtener más economías de escala, una mayor sostenibilidad y un grado más alto de eficiencia. Los sistemas de alerta temprana para amenazas múltiples también se activarán con mayor frecuencia que un sistema de alerta dedicado sólo a una de éstas y por lo tanto deberán ofrecer mejores funciones y una mayor fiabilidad para aquellos eventos de gran intensidad, tales como los tsunamis, los cuales no se producen tan a menudo. Asimismo, los sistemas para amenazas múltiples sirven para comprender mejor la variedad de riesgos que se enfrentan y refuerzan las acciones adecuadas de preparación y las conductas de respuesta frente a una alerta.

Participación de las comunidades locales

Los sistemas de alerta temprana se basan en la participación directa de quienes tienen más probabilidad de estar expuestos a las amenazas. Es muy probable que sin la participación de las autoridades y las comunidades locales en riesgo, las intervenciones y respuestas gubernamentales e institucionales resulten inadecuadas. Un enfoque local "de abajo hacia arriba" para la alerta temprana, con la activa participación de las comunidades locales, permite desarrollar una respuesta multidimensional ante los problemas y necesidades existentes. De esta manera, las comunidades locales, los grupos cívicos y las estructuras tradicionales están en condiciones de contribuir a reducir la vulnerabilidad y a fortalecer las capacidades locales.

Consideración de la perspectiva de género y la diversidad cultural

Para desarrollar sistemas de alerta temprana es indispensable comprender que cada grupo tiene vulnerabilidades distintas en función de su cultura, género u otras características que inciden en su capacidad de prepararse eficazmente frente a los desastres, prevenirlos y responder ante los mismos. Los hombres y las mujeres desempeñan funciones diferentes en la sociedad y tienen un grado distinto de acceso a la información en situaciones de desastre. Además, los grupos de ancianos, discapacitados y personas social y económicamente desfavorecidas suelen ser más vulnerables.

Actores principales

Las **comunidades**, en particular las más vulnerables, revisten una importancia fundamental para los sistemas de alerta temprana especialmente centrados en la población. Es necesario que las mismas participen activamente en todos los aspectos del establecimiento y el funcionamiento de tales sistemas, que conozcan las amenazas y posibles impactos a los que están expuestas y que puedan adoptar medidas para reducir al mínimo la posibilidad de sufrir pérdidas o daños.

Las **autoridades locales**, al igual que las comunidades y las personas, constituyen el núcleo de un sistema eficaz de alerta temprana. Los gobiernos nacionales deben facultar a las autoridades locales y éstas deben tener un alto grado de conocimiento sobre las amenazas a las que se exponen sus comunidades y participar activamente en el diseño y el mantenimiento de los sistemas de alerta temprana. Las autoridades locales también deberán comprender la información sobre recomendaciones básicas que reciban y estar en condiciones de asesorar, instruir y hacer participar a la población local a fin de incrementar la seguridad pública y reducir la posible pérdida de recursos de los que depende la comunidad.

Los **gobiernos nacionales** son responsables de las políticas y marcos de alto nivel que facilitan la alerta temprana, y de los sistemas técnicos que prevén y emiten las alertas nacionales de amenaza. Los gobiernos nacionales deberán interactuar con las autoridades y agencias regionales e internacionales para reforzar las capacidades de los sistemas de alerta temprana y encargarse de que las alertas y las consiguientes respuestas vayan dirigidas a las poblaciones más vulnerables. Otra de sus funciones fundamentales es prestarles ayuda a las comunidades y gobiernos locales para que desarrollen sus capacidades operativas.

Las **instituciones y organizaciones regionales** desempeñan un papel fundamental en la transmisión de conocimientos y asesoramiento especializado en apoyo a las medidas nacionales destinadas a desarrollar y a mantener las capacidades de alerta temprana en aquellos países que comparten un entorno geográfico común. Además, estos entes estimulan el establecimiento de vínculos con organizaciones internacionales y facilitan la difusión de buenas prácticas en materia de alerta temprana entre países vecinos.

Los **organismos internacionales** pueden ofrecer coordinación, estandarización y asistencia internacional para las actividades nacionales de alerta temprana, y fomentar el intercambio de información y conocimientos entre distintos países y regiones. Este tipo de apoyo puede incluir información sobre recomendaciones básicas y asistencia técnica, organizativa y en materia de políticas. Estos aspectos son necesarios para contribuir a desarrollar capacidades operativas de las autoridades o agencias nacionales.

Las **organizaciones no gubernamentales** tienen una función de concientización entre las personas, comunidades y organizaciones que participan en la alerta temprana, sobre todo en el ámbito local. También pueden ayudar a la implementación de sistemas de alerta temprana y a preparar a las comunidades a enfrentar los desastres naturales. Además, pueden desempeñar un importante papel en la promoción de la alerta temprana para que se mantenga en la agenda de los gobiernos y los encargados de la formulación de políticas.

El **sector privado** desempeña un papel muy diverso en este campo. Ello incluye el desarrollo de capacidades de alerta temprana en sus propias organizaciones. Los medios de comunicación juegan un papel fundamental para mejorar el nivel de conocimiento sobre desastres entre la población en general y para difundir alertas tempranas. Asimismo, el sector privado cuenta con un amplio potencial que aún no se ha aprovechado en cuanto al suministro de servicios especializados tales como mano de obra técnica, conocimientos aplicados y donativos (en especie o en efectivo) de bienes y servicios.

La **comunidad científica y académica** también juega un papel crucial al ofrecer insumos científicos y técnicos especializados para ayudar a los gobiernos y a las comunidades a desarrollar sistemas de alerta temprana. Sus competencias son fundamentales para analizar los riesgos de las amenazas naturales que enfrentan las comunidades, contribuir a la elaboración de servicios científicos y sistemáticos de seguimiento y alerta, fomentar el intercambio de información, traducir la información científica o técnica en mensajes comprensibles y difundir alertas que puedan entender las personas en riesgo.

9.1.6 Instrumentos

En el presente numeral se establece la instrumentación mínima requerida para la puesta en funcionamiento de un SAT tanto a nivel local como a nivel nacional; se tienen en cuenta sus componentes básicos y se describe con base en instrumentaciones existentes; además, se mencionan ciertos protocolos para la adquisición de datos, emisión de alertas y respuesta. En relación con el conocimiento del riesgo, las actividades desarrolladas para la definición e implementación de un modelo de vulnerabilidad social del presente proyecto cubren los objetivos de este elemento, por lo que se sugiere tomar los elementos allí analizados como parte del SAT en la cuenca alta del Río San Cristóbal.

Seguimiento y alerta

SAT Centralizados

Un Sistema de Alerta contra inundaciones está basado en un conjunto de estaciones pluviométricas e hidrométricas, ubicadas en las diferentes cuencas hidrológicas en que se divide la región en estudio (Figura 9-6). Estas estaciones miden la precipitación acumulada, la intensidad de lluvia y los niveles de los cauces y envían la información vía radio a un puesto central de registro (Figura 9-7). Allí se procesan los datos con los modelos lluvia-deslizamientos y lluvia-inundación para estimar los efectos esperados en las zonas vulnerables y los pronósticos de los tiempos de ocurrencia de los niveles críticos en los cauces. Al rebasarse ciertos umbrales establecidos, se activan alarmas indicando a los usuarios, generalmente autoridades de Protección Civil, sobre el peligro de la posible ocurrencia de flujos e inundaciones que pudiesen provocar daños en una cierta área de la cuenca y poder poner así en marcha un plan de emergencia previamente establecido.

Funcionamiento del sistema²

En la Figura 9-8. se observa cómo está constituido un sistema de alerta: un cierto número de estaciones remotas, distribuidas en las regiones de interés, y dos puestos centrales de registro, que es donde se concentran los datos de lluvia y de nivel de agua de los ríos. El Puesto Central de Registro (PCR-1) se encarga de consultar a cada una de las estaciones remotas a intervalos fijos de 10 minutos.

² Fuentes Mariles O., Quaas Weppen R., Jiménez Espinosa M., Eslava Morales H., Gonzalez Prado J., (2002). Informes Técnicos: Sistemas de Alerta Hidrometeorológica en Acapulco, Tijuana, Motozintla, Tapachula y Monterrey. CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres.; Coordinaciones de Investigación e Instrumentación; México 2002.

Para ello envía un código a la estación en turno, solicitándole el envío de la información recolectada en los 10 minutos anteriores. Una vez que los datos de un intervalo han sido recibidos, decodificados y desplegados en forma tabular, se almacenan en un archivo para ser procesados y analizados por las computadoras. Si después del análisis y procesamiento de cada uno de estos archivos los datos resultantes sobrepasan los umbrales preestablecidos, de acuerdo con el estudio hidrológico, se activa una alarma visual en la pantalla y también se acciona una señal auditiva de alerta que da aviso al personal de la guardia y supervisión del sistema, para que de acuerdo con los procedimientos de emergencia establecidos tome las medidas necesarias.

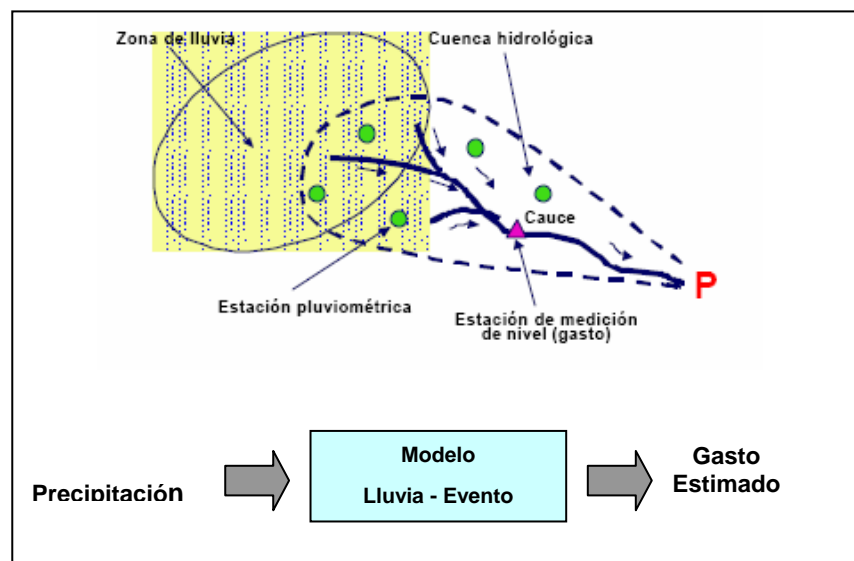


Figura 9-6. Medición de condiciones hidrometeorológicas

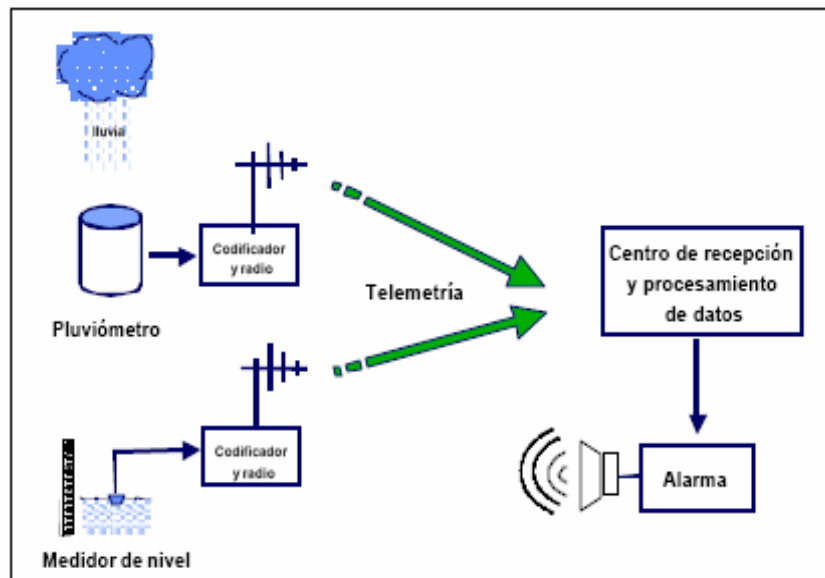


Figura 9-7. Sistema de medición y alerta

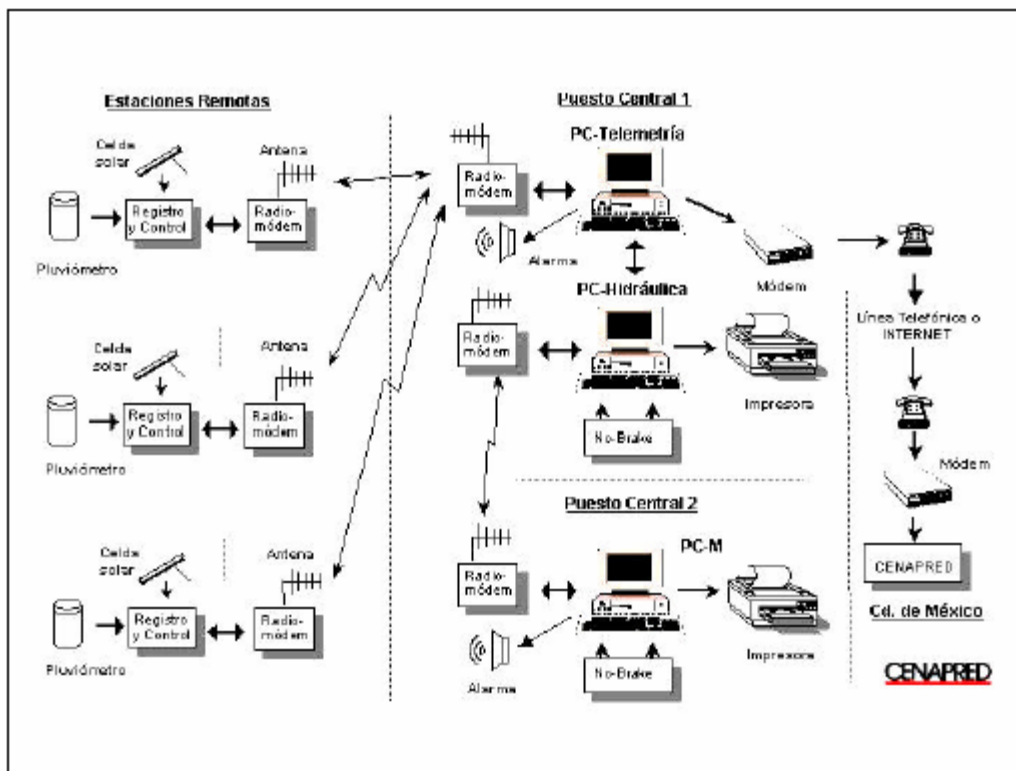


Figura 9-8. Diagrama general de un sistema de alerta telemétrico

Cuando el proceso de consulta de un intervalo ha concluido y se han procesado los datos, el PCR-1 envía el archivo con los datos del último intervalo de consulta hacia el puesto PCR-2. Éste es un espejo del PCR-1, excepto que no controla el proceso de consulta, sólo recibe el archivo con todos los datos de precipitación ya recolectados. Una vez recibidos, los analiza y los presenta en pantalla en la misma forma que en el PCR-1. También procesa las alarmas de igual manera.

En el caso de cuencas de respuesta rápida, en la que se producen deslizamientos súbitos de los cuales es difícil advertir, se han incorporado alarmas de intensidad por lluvia, con umbrales definidos. De esta manera el sistema revisa si estos son excedidos y cuando esto ocurre se activa una alarma visual y sonora.

Además del monitoreo de condiciones hidrometeorológicas, también puede ser adicionado un monitoreo de laderas.

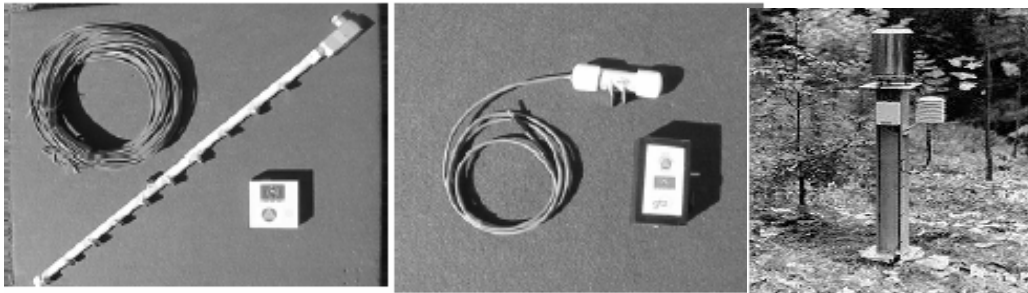


Figura 9-9. Instrumentos de medición de condiciones hidrometeorológicas. Sensor digital de niveles del río, alarma automática y pluviómetro

Medidas generales de monitoreo y alerta en laderas

Estos sistemas proporcionan frecuentemente la alerta de movimiento de laderas, con el tiempo suficiente para la construcción física de medidas que podrían reducir el peligro inmediato o a mediano o largo plazo.

Las técnicas de monitoreo incluyen la observación de campo y el uso de varios instrumentos apropiados para medir los movimientos del terreno natural. En forma genérica, entre otros instrumentos se pueden incluir medidores de alambre, radares, rayos láser y medidores de vibración. La información proporcionada por estos instrumentos puede manejarse en tiempo real mediante un sistema de telemetría.

En las zonas identificadas como potencialmente peligrosas, en lo que se refiere a problemas de inestabilidad de laderas es importante implementar medidas de monitoreo permanente, tales como:

- Medición de la cantidad de agua de lluvia, asociada a las características de saturación del material térreo que pueden desencadenar la inestabilidad de una ladera. Para cuantificarla es posible disponer de una serie de pluviómetros simples y económicos.
- Detección y medición directa de deformaciones y agrietamientos de la superficie de las laderas y sus tendencias de crecimiento.
- Medición directa de la presión del agua subterránea, mediante la instalación de piezómetros.
- Cuando algún problema de inestabilidad de laderas se presenta en forma lenta y paulatina, involucrando directamente a una zona habitada, los mismos moradores suelen detectar oportunamente la aparición de grietas en muros y pisos de las construcciones. Esto puede considerarse como una de las técnicas de monitoreo más confiables.

Monitoreos sistemáticos

Específicamente y para monitorear en forma sistemática y con la aplicación de las tecnologías apropiadas la evolución de la inestabilidad de una ladera, es importante tener presente la medición a lo largo del tiempo de ciertos parámetros, tales como:

- Niveles de agua subterránea en la pendiente de la ladera.
- El desplazamiento o movimiento, incluyendo: la profundidad de la superficie de falla o deslizamiento, la dirección, magnitud y velocidad del movimiento.
- Medición directa y continua de la evolución de la presión del agua subterránea, mediante la instalación de piezómetros de medición continua y señal telemétrica.

Para esto, la tecnología actual nos permite disponer de las técnicas siguientes, entre otras:

- Inclínómetros, que permiten detectar dirección de la superficie de falla o deslizamiento.
- Extensómetros, que permiten indicar la magnitud del desplazamiento
- Piezómetros, que permiten determinar los niveles de agua subterránea infiltrada en el cuerpo de una ladera.

Para hacer uso de algunas de las tecnologías mencionadas, será indispensable diseñar el sistema de instrumentación y monitoreo, en función de las características geotécnicas, geohidrológicas y morfológicas particulares de cada problema en particular.

En el Anexo F-3 se presentan dos sistemas de alarma instalados en Colombia que utilizan adquisición de datos remota y que pueden servir como guía de instrumentación.

SAT Comunitarios

Es importante aclarar que a partir del estudio hidrológico de la cuenca y el correspondiente modelamiento de las variables que influyen en este tipo de eventos, se establecen los sitios de medición, protocolos de adquisición de datos, pronóstico de eventos y difusión de las alarmas. Sin embargo, podemos mencionar que la mayoría de los Sistemas comunitarios que en la actualidad funcionan, operan con base en estaciones de monitoreo, coordinación y respuesta, interconectadas mediante una red de radiocomunicación, apoyada por las autoridades locales, unidad de salud, policía, etc.

Los Sistemas de Alerta Temprana comunitarios, comprenden dos actividades que están enmarcadas dentro del componente Seguimiento y Alerta descrito en apartados anteriores; estas son, el monitoreo y el pronóstico de eventos. El monitoreo y la alerta se basan en las siguientes actividades simples y estandarizadas: medir la precipitación, medir niveles fluviales, definir la probabilidad de inundación a partir de sencillos protocolos y difundir la información de alerta.

La medición de la precipitación se realiza generalmente en las partes altas de la cuenca; esta es llevada a cabo por voluntarios residentes distribuidos en la misma. Por tal motivo, se requiere un tipo de instrumentación simple y práctica de tal manera que su operación requiera un mínimo de capacitación. Además, la instrumentación implementada debe ser fácilmente reemplazable (en caso de fallar) y a bajo costo para que el sistema funcione en forma continúa. En este sentido, la precipitación se mide con pluviómetros normales, que pueden ser contruidos por la comunidad o prefabricados. Las mediciones pueden ser tomadas cada hora o según el estudio hidrológico o el grado de emergencia lo indiquen. Cabe mencionar que la utilización de pluviómetros brinda un tiempo de aviso adicional. Para la adquisición de estos datos, debe establecerse un manual en el que se encuentren detallados los intervalos de medición, formato de registro y mantenimiento de la instrumentación.

Los niveles fluviales se miden en forma similar a las precipitaciones. Aquí se utilizan instrumentos electrónicos que despliegan la información digitalmente con dígitos entre 0 y 9 según el nivel del río; además están provistos de una alarma sonora que se activa si la inundación comienza mientras los observadores duermen. En algunos ríos se utilizan escalas hidrométricas que igualmente pueden ser adquiridas o fabricadas por la comunidad. Generalmente, estas son instaladas en los tramos rectos de cada río y sus tributarios. Igual que para la toma de datos de precipitación, para datos de niveles fluviales debe existir un manual en el que se encuentren detallados los intervalos de medición, formato de registro y mantenimiento de la instrumentación (Ver Figura 9-10).

Además del registro de datos en campo, éstos se transmiten mediante una red de radiocomunicación a Centros de pronóstico operados por Comités Locales de Emergencias (CLE) (Figura 9-11). Este sistema permite a todos los miembros estar al tanto permanentemente de lo que sucede. El número de radios depende del número de voluntarios de monitoreo, de pronóstico y de respuesta. También, las autoridades locales y en general todas las instituciones, organizaciones y actores involucrados en el sistema deben poseer algún tipo de comunicación directa.

Algunos de estos equipos de radiocomunicación pueden ser estacionarios o portátiles. Es importante después de la organización comunitaria establecer quien poseerá los radios portátiles y quien los estacionarios. Generalmente, la máxima autoridad local o quien ordena operativos de movilización de la comunidad es quien posee radios portátiles.



Figura 9-10. Sensor de medición operado por la comunidad

En cualquier caso, es importante que la instrumentación de medición y comunicación contemple fuentes de energía que respalden el sistema en caso de apagones. La instrumentación puede contemplar el uso de baterías recargables como principal fuente de energía o un mecanismo de paneles solares.



Figura 9-11. Transmisión de los datos por voluntarios de la comunidad a través de radiocomunicación

En cuanto al pronóstico de eventos, una vez recibida la información de las estaciones de medición, se procede al cálculo de los parámetros críticos. Esta actividad debe ser desarrollada una vez establecido un protocolo de pronóstico resultado del modelamiento hidrológico de la cuenca. El pronóstico generalmente se basa en las cantidades de lluvia acumuladas en intervalos de tiempo determinados; si ésta sobrepasa el valor prefijado en el modelamiento se presentará una inundación. Los niveles del río sirven como mecanismo de confirmación del evento, los cuales deben pasar también niveles críticos previamente establecidos. Para esta actividad también debe ser desarrollada una guía de pronóstico.

Una vez el CLE establece la inminencia de un evento, transmite las alertas a las autoridades y a la población situada en las planicies aluviales, a través de la misma red de radio, para empezar las actividades propias de emergencia. También, pueden ser transmitidas las alertas mediante alarmas auditivas y en este caso debe tenerse en cuenta el alcance de las mismas, su mantenimiento y fuente de energía.

Es importante la recopilación de información durante las inundaciones, con el fin de actualizar los datos en la cuenca y revisar los parámetros hidrológicos. Siempre que existan eventos catastróficos es importante realizar una evaluación del monitoreo, la predicción y la alerta.

En general la precisión de las alertas y la oportuna transmisión de las alertas dependen en gran medida del trabajo de adquisición de información y en las actividades de pronóstico. Los parámetros críticos deben ser establecidos con una base científica sólida y confiable. Igualmente, el trabajo de los voluntarios debe ser desarrollado con un alto nivel de compromiso.

Es importante ubicar en un mapa cada una de las estaciones de medición, el centro de pronósticos y es posible la ubicación del personal encargado del monitoreo.

Difusión y comunicación³

Uno de los componentes más importantes de cualquier SAT es la difusión de las alertas a las comunidades que serán afectadas por los eventos. Por tal motivo, se hace necesario desarrollar esquemas de difusión de las alertas y protocolos para normar la declaración de las alertas.

En los sistemas comunitarios se emplean métodos sonoros algunas veces rudimentarios tales como sirenas o megáfonos. En el caso de los sistemas nacionales se recurre a medios masivos de información tales como televisión, prensa y radio.

Por lo general, en los sistemas comunitarios no se han implementado protocolos para normar la difusión de alertas, sobre todo porque es un tema muy reciente y se tiene poca experiencia al respecto. Es de esperarse que en la medida en la cual se consolidan los Comités Nacionales de Emergencias con sus protocolos de operaciones, en esa medida se inicie un fortalecimiento de los SAT existentes mediante la redacción e implementación de protocolos para la difusión de alertas.

Los protocolos de difusión de alertas deben enfocar los siguientes aspectos:

- Condiciones preexistentes que deben dar lugar a la emisión de alertas
- Condiciones determinantes para difundir los distintos tipos de alertas (Verde, amarilla, naranja y roja).
- Contenidos de los mensajes que se emiten en las alertas, formatos de divulgación: boletines, conferencias de prensa, notificación a entidades de carácter regional o nacional, etc.

³ Villagran de León J. C. SAT's Sistemas de Alerta Temprana para Inundaciones en Centroamérica. Panamá.

- Difusión de alertas mediante medios de difusión (medios masivos o el uso de sirenas en comunidades, etc.)
- Bitácora de avisos.

A continuación se describe en forma más detallada cada uno de estos puntos relacionados con la difusión de alertas.

Condiciones preexistentes para las emisiones de alerta

Una vez que el comité o unidad encargada de análisis y pronóstico manifiesta la inminente presencia de un evento natural, es responsabilidad del operador encargado del sistema iniciar actividades para la difusión de alertas. Para facilitar la operación de esta fase del sistema de alerta temprana se requiere que el operador encargado del sistema cuente con un manual de procedimientos, que debe incluir:

- A quien o quienes se debe notificar sobre un posible evento
- Cómo debe hacer la notificación sobre el posible evento
- Cuando debe proceder a hacer la notificación
- Donde se debe hacer la notificación

Típicamente esta información se debe encontrar en el manual o los manuales de procedimientos que acompañe el SAT.

Tipos de alerta

Reconociendo que algunos eventos como las inundaciones pueden predecirse con algún tiempo de antelación, se puede entonces elaborar protocolos para la emisión de 4 tipos de alertas distintas:

VERDE: cuando existen las condiciones generales para que se presenten eventos.

AMARILLA: cuando se están generando las condiciones específicas para un evento potencialmente grave.

NARANJA: cuando se han concretado las condiciones necesarias para que se presente el evento y sólo sea cuestión de minutos y horas para que se manifieste.

ROJA: cuando ya se manifestó el evento y ha causado o está causando daños.

En cualquiera de estos cuatro casos es necesario que se cuente con protocolos que indiquen qué actividades se deben ejecutar, qué procedimientos se deben implementar y cómo se debe dar un seguimiento al evento.

Es importante que en el manual de procedimientos se indique:

- A quien se debe notificar de acuerdo al tipo de alerta emitida
- Cómo se debe hacer la notificación con relación al tipo de alerta emitida
- Cuándo debe proceder a hacer la notificación de acuerdo al tipo de alerta en cuestión
- Dónde se debe hacer la notificación en cada caso

Contenido de mensajes para distintos tipos de alerta: formatos

Reconociendo que la información que emana del SAT con respecto a alertas tiene que llegar a las autoridades y a distintos tipos de instituciones, es necesario que cualquier mensaje sea claro, conciso y contenga la información necesaria para explicar la situación que se está presentando.

Aunque el formato de redacción de los mensajes aun no está normado, se recomienda contar con el apoyo de la institución nacional de protección civil o defensa civil para la redacción de los textos y los mensajes para lograr los objetivos que se plantean en el párrafo anterior.

El mensaje debe contener la siguiente información:

1. Fecha, día y hora a la cual se emite el mensaje
2. Fuente o persona que emite el mensaje
3. Tipo de evento que se está presentando, dimensión o impacto esperado
4. Acción sugerida o necesaria que se debe tomar, lo que puede incluir el inicio de coordinaciones institucionales
5. Estado de verificación

Como se observa, el mensaje debe explicar qué tipo de situación se está presentando y qué clase de acción se debe tomar como resultado del mensaje. El uso de formatos preestablecidos es típico en esta actividad y muy valioso en forma posterior para evaluar la efectividad con la cual se activaron los comités municipales y locales de emergencia durante el evento, así como otras instituciones y los distintos medios de difusión.

Reconociendo que un evento implica la respuesta escalonada de distintas personas e instituciones, en el manual de operaciones del SAT debe quedar normado cuando se debe emitir los mensajes y a quien, para así institucionalizar la operatividad y legitimidad del SAT.

Difusión de Alertas: Medios Masivos

Sabiendo que la información que emana del SAT con respecto a alertas tiene que llegar a la población amenazada, se puede hacer uso de medios masivos como la radio, la televisión o la prensa para este fin. El medio a usarse depende del grado de antelación con el cual se cuenta para difundir la alerta.

Por ejemplo, en el caso de huracanes, se tiene suficiente tiempo desde que se forman para utilizar los distintos medios para difundir información sobre el evento. Sin embargo, en el caso de inundaciones repentinas, quedan fuera como medios de alerta los periódicos. En estos casos, las radioemisoras y la televisión pueden jugar un papel protagónico. Sin embargo, un punto crítico es siempre el control de los medios para que alerten sin provocar crisis y generar el pánico en la población.

En la práctica, existen algunos medios con mayor disposición a apoyar a las instituciones de defensa o protección civil en la difusión de alertas sobretodo siguiendo lineamientos preestablecidos por la entidad. Sin embargo, se debe reconocer la competitividad existente entre los medios por reportar de primero una noticia o mensaje de este tipo.

Por tal motivo, se recomienda normar la divulgación de boletines informativos en horarios pre-establecidos, con lo cual se evita el favorecer a un medio sobre otro en caso de existir varios en la región donde se difunde la alerta.

De igual manera se recomienda el uso de mensajes con formatos pre-establecidos para evitar confusión en la información. Así como en el caso anterior, los boletines de prensa deben contener el siguiente formato:

1. Encabezado: Boletín No. XX.
2. Fecha, día y hora a la cual se emite el mensaje

3. Fuente o persona que emite el mensaje
4. Tipo de evento que se está presentando, dimensión o impacto esperado
5. Acción sugerida o necesaria que se debe tomar, lo que puede incluir el inicio de coordinaciones institucionales
6. Estado de verificación.

Los medios tienen acceso a fuentes de información vía INTERNET y fuentes periodísticas de tipo internacional (CNN, AP, Reuters, etc.), de manera que es necesario que los SAT se ganen la confianza de los medios mediante un apego a horarios de difusión y mediante la emisión de mensajes que fortalecen la confianza en la información generada por los operadores del SAT.

Para lograr este objetivo se puede invitar a la prensa a que conozca todas las interioridades del SAT, su estructura y su funcionamiento en épocas no críticas. Se recomienda que este tipo de actividades sea respaldado por parte de la institución nacional de protección civil para consolidar la legitimidad del SAT y la veracidad de la información que genera.

Bitácora de Avisos

El manejo de la información en forma sistemática es un indicador del profesionalismo con el cual opera un SAT. Por tal motivo, se hace necesario dotar a los operadores del SAT con una bitácora en la cual queden archivados todos los mensajes que emanan del mismo.

El uso de la bitácora permite a su vez a los operadores llevar a cabo tres tipos de actividades:

1. Operación normada de un control de calidad basado en la emisión de información.
2. Generación de historial de casos, lo que puede ayudar a operaciones más fluidas con base en prácticas o experiencias anteriores.
3. Evaluación de la operación rutinaria y en caso de eventos del SAT para el reconocimiento de puntos críticos, deficiencias existentes y posibles mejoras.

Se coordina mediante la alerta previa a Instituciones y autoridades encargadas que jueguen un papel importante en la fase de respuesta y en la difusión pública con la población previamente sensibilizada sobre la existencia de la amenaza con el fin de que los procedimientos de respuesta sean efectivos.

En el Anexo F-4 se encuentran los protocolos establecidos para la operación rutinaria del sistema y en caso de eventos potencialmente catastróficos.

Capacidad de respuesta

Antes de pensar en establecer cualquier Sistema de Alerta Temprana, se debe realizar un diagnóstico mediante el cual se pueda conocer la realidad de la población que se va a involucrar. Con este diagnóstico se busca conocer la realidad de la población, su percepción con respecto a la amenaza de un evento natural y el conocimiento que tienen sobre las acciones a realizar en una eventual emergencia. Con base en esta información se establecerá el seguimiento que se dará al proyecto y el establecimiento de un SAT, el cual no puede ser sin la participación directa y la apropiación de la población.

Para que el Sistema de Alerta Temprana tenga utilidad, se requiere de involucrar el conocimiento y la confianza de la población afectada, para lo cual las familias en riesgo deben participar a todo lo largo del proyecto, como actores y gestores de la preparación de planes comunales e institucionales de emergencia.

Además, estas comunidades deben participar en capacitaciones y promoción de acciones para mitigación del riesgo y puesta en funcionamiento del sistema de alerta temprana.

Esta parte del proyecto debe fortalecer y organizar a los comités locales y comunales de emergencia, debe existir una coordinación interinstitucional, además de una buena convocatoria y sensibilización para la participación de la comunidad en dicho proyecto.

El componente social debe organizarse con base en las reglas y los reglamentos dictados por las autoridades municipales y las instituciones nacionales de reducción de los desastres. En general, estas instituciones son las responsables de la seguridad y el bienestar de la población, por lo que deben incluirse en las diversas actividades relacionadas con los sistemas de alerta temprana. Las siguientes son las etapas en este caso:

- Etapa 1. Se establecen o fortalecen los lazos con la entidad nacional de emergencias, los líderes municipales y el personal voluntario para que el sistema pueda implementarse en forma coordinada.
- Etapa 2. Se crean comités para ejecutar las tareas requeridas de capacitación, organización comunitaria y respuesta.
- Etapa 3. Se realizan talleres para capacitar a los miembros del comité sobre los detalles de cómo operan los sistemas de alerta temprana.
- Etapa 4. Se aplican estrategias para informar al público sobre el sistema y fomentar vínculos con miembros de la comunidad, con el fin de crear conciencia social sobre los sistemas de alerta temprana y sus virtudes.
- Etapa 5. Se involucra a los líderes comunitarios y otros miembros de la comunidad en diversos comités dedicados a la planificación para emergencias.
- Etapa 6. Se realizan talleres para capacitar a miembros de la comunidad en las diversas tareas requeridas para completar los sistemas de alerta temprana, como el mapeo de riesgo y vulnerabilidad, la planificación y coordinación para emergencias, la identificación de rutas de evacuación, las actividades de búsqueda y rescate, la selección y manejo de albergues, la gestión de crisis y la coordinación interinstitucional.
- Etapa 7. Se somete a prueba el sistema por medio de pruebas de funcionamiento y simulacros.

En general, son delegados de los comités nacional y municipal de emergencias quienes ejecutan estas últimas etapas, puesto que cuentan con el conocimiento y la experiencia necesarios para tales tareas.

Los sistemas a lo largo de América Central se han implementado en plazos de entre seis y ocho meses, para garantizar el cumplimiento de todas las etapas. La participación de la entidad nacional de reducción de los desastres ha sido clave para fomentar la sostenibilidad local.

Se debe acompañar el establecimiento de los SAT telemétricos o comunitarios, con concientización y participación de la población y las autoridades de manera que se pueda crear una cultura de preparación.

El Sistema de Alerta contra inundaciones funciona a través de cuatro grupos de personas:

- Los voluntarios que miden las lluvias, niveles del río y reportan los resultados al Centro de Operación de Emergencias (COE).
- Los voluntarios que trabajan en el COE para recibir los datos de campo y pronosticar inundaciones.
- Los voluntarios que usan sus propias lecturas de lluvia para pronosticar inundaciones en los ríos locales que afectan sus comunidades.
- Los Comités Locales de Emergencia (CLE) que implementan los planes de emergencia ante un pronóstico de inundación.

Es importante ubicar en un mapa todos los sitios donde viven los voluntarios que pertenecen a cada uno de los grupos y que ejecutan las tareas que corresponden. El buen funcionamiento del sistema depende de cada uno de estos voluntarios.

Para el establecimiento de estos grupos de personas, se deben identificar los líderes y el recurso humano con que se cuenta y que pueda tener potencial para el desarrollo, mantenimiento y sostenibilidad de un SAT (Organización comunal).

Antes de discutir las responsabilidades de cada uno de los grupos mencionados, debemos aclarar la importancia que tiene la formación de un Comité de Organización Comunitaria con personas que estén dispuestas a responsabilizarse por el buen funcionamiento del sistema, monitoreando que todos los equipos de trabajo estén cumpliendo con su función de acuerdo con los protocolos que se establezcan. Deben ser representantes de cualquiera de los grupos mencionados en el apartado 8.1.5.

En los Anexos F-4 y F-5 se presentan protocolos establecidos para la operación de SAT comunitarios y un manual de funciones de actores. De esta manera, se puede apreciar de manera mas clara la instrumentación requerida en lo relacionado con organización comunitaria y protocolos de operación de un SAT.

9.1.7 Aplicación a la cuenca piloto

Siguiendo los lineamientos presentados en los numerales anteriores se hace un análisis de cada uno de los elementos que se recomienda deben hacer parte del SAT para la parte alta del Río San Cristóbal, cuyo objetivo principal es alertar a la población que habita en las riberas de las quebradas El Triangulo y La Pichosa y a lo largo del Río San Cristóbal entre las Carreras 22 este y 10^a.

En el análisis de alternativas de mitigación de cada sector que se hace posteriormente se concluye que este sistema de alerta es la primera etapa de las

estrategias a aplicar, mientras que se implementan las estrategias estructurales que allí se recomiendan en cada zona.

A continuación se presentan los elementos particulares a tener en cuenta para el SAT de la parte alta del Río San Cristóbal. Para la aplicación del SAT se recomienda la aplicación de los protocolos presentados en el Anexo F-4, desarrollados por Villagrán de León (200 para Centro America.

Conocimiento del riesgo

Como ya se mencionó para los barrios afectados en la parte alta de la cuenca del Río San Cristóbal se hizo un análisis completo de diferentes indicadores de vulnerabilidad social, entre los cuales se incluye el análisis de vulnerabilidades y capacidades, los cuales son la base para el diagnóstico del conocimiento del riesgo por parte de la población.

Los alcances de este diagnóstico se presentó en el Capítulo 5-Metodología (Sección 5.12.2) y la aplicación con base en la información secundaria recolectada de diferentes entidades y de entrevistas a los líderes de la comunidad y talleres comunitarios por barrio, se implementó y análisis en el Capítulo 8 y Anexo E-7.

En términos generales se puede concluir que la mayoría de la población no identifica los procesos de inundación y flujos como un riesgo significativo, esto se puede explicar porque en el sector los principales problemas están asociados con inestabilidad del terreno. Sin embargo, existen algunas excepciones relacionadas con personas que viven a lo largo de las quebradas que de alguna forma han experimentado inundaciones y otros que han sufrido este tipo de experiencias en el pasado en otros sitios.

No hay coherencia entre los eventos mencionados por la comunidad como eventos de riesgo relacionados con inundación o flujos y los registros históricos, en algunos casos se evidenció que se mencionaban casos relacionados con inundaciones por lluvias y no por elevación del nivel de las quebradas. Esto sugiere la necesidad de instruir a la población sobre las amenazas directas relacionadas con la quebrada como son las inundaciones.

La población es consciente que la topografía de la zona favorece el escurrimiento de las aguas hacia las quebradas y que los efectos se concentran a lo largo de estas y que un factor que puede incrementar la posibilidad de riesgo en el sector es la obstrucción de las estructuras hidráulicas, sin embargo la falta de saneamiento básico impide que este problema se minimice.

Dentro de las prioridades de la población el tema de la mitigación de riesgos y la preservación ambiental no están dentro de las más importantes. Esto se explica por la necesidad de la población de satisfacer primero sus necesidades básicas antes que pensar en el tema de riesgo o el tema ambiental. En este sentido es importante que en las estrategias de comunicación y participación ciudadana para la mitigación de riesgos se puedan implementar proyectos productivos para hacer atractivo el tema. Por ejemplo se pueden implementar proyectos de cultivo y venta de especies que sirvan para estabilizar las laderas y proteger la cuenca, donde los habitantes puedan percibir algún beneficio económico.

Se debe hacer un esfuerzo importante en estas comunidades en relación con establecer, y en otros casos fortalecer, la cooperación comunitaria. Se identificaron serios problemas de liderazgo y de convivencia, entre habitantes del mismo barrio y en especial entre habitantes de barrios aledaños.

Aunque los presidentes de las juntas de acción comunal (no siempre líderes de su comunidad) asisten al CLE y reciben la capacitación que se brinda a través de este comité, sus experiencias y conocimientos no son transmitidos a la comunidad, en muchos casos por falta de participación comunitaria en las actividades que las juntas organizan y en otros varios casos por falta de compromiso de los presidentes y juntas de acción.

Existe un alto nivel de ausentismo de la población en las actividades comunitarias, incluidos los talleres y entrevistas realizados dentro del desarrollo del proyecto. Se identificó que esto se debe en unos casos a la falta de liderazgo de las presidentes de la junta y en otros por puro desinterés, muchas personas que asistieron a los talleres después de ver de que se trataba se iban, parece ser que esta actitud es lo habitual.

Existe un alto nivel de alfabetismo en el sector, lo que facilita la implementación de estrategias de comunicación y concientización. Se identificaron en las diferentes comunidades personas que cuentan con mayor nivel educativo, los cuales usualmente también son personas de alto reconocimiento entre la comunidad, estas fueron entrevistadas de manera personal y están incluidas en la Tabla 5-17.

Los barrios más vulnerables físicamente son también los más vulnerables socialmente, entre estos se destacan Aguas Claras, La Gran Colombia, Laureles y Montecarlo. Esta vulnerabilidad está íntimamente relacionada con la escasez de servicios básicos.

Los indicadores económicos muestran que la zona está constituida por una población con pocas posibilidades de autosostenimiento y que las estrategias de mitigación deben ser subsidiadas. El nivel de producción económica dentro del sector es bajo y se asocia en su gran mayoría con actividades comerciales.

Aunque se identificaron algunas industrias éstas no son suficientes para generar empleo y algún tipo de sostenimiento económico para la población.

No se identificaron planes a largo plazo de inversión por parte de la localidad en proyectos de mitigación del riesgo. La asignación presupuestal al tema no tiene ningún tipo de estudio y se asigna más bien como una reserva preventiva.

En relación con la degradación ambiental se observa que la zona presenta serios problemas de disposición de residuos sólidos, los cuales normalmente son arrojados a las quebradas, así como los escombros de construcción. Los antecedentes de eventos de inundación y flujos (identificados en el Capítulo 2- Antecedentes), se han asociado con estos escombros. Por otra parte se encuentra un buen número de predios dentro de la zona de ronda y varios otros en zonas de inestabilidad geotécnica. A pesar de que la población en zonas inestables y al lado de la quebrada son concientes de que su nivel de riesgo, por falta de recursos se sienten obligados a estar allí.

Una revisión de campo relacionada con la calidad de las construcciones permite concluir que en la zona no hay un cumplimiento de las normas de construcción. Se identificaron predios donde además de la mala técnica constructiva tampoco existe mantenimiento de las construcciones. Debido a que muchos de los habitantes se dedican a la construcción, la población tiene la falsa sensación de seguridad porque confían en sus propios criterios de calidad, en este sentido se pueden ver viviendas muy vulnerables por tener deficientes sistemas estructurales o distribución de cargas asimétricas en planta y en elevación, condiciones que para los habitantes del sector no son un problema.

A nivel privado y en instituciones públicas se observa que no existen planes de mantenimiento o reforzamiento contra eventos de inundación. No se encontraron elementos estructurales que busquen controlar inundaciones, a pesar de que en algunos sectores es evidente que la exposición es muy alta.

En términos de capacidad de respuesta se pudo concluir que en el sector no ha existido ningún plan de emergencia, o si existe no se ha socializado con la comunidad. No existen protocolos o instrucciones con relación a que se debe hacer en casos de emergencia. En este sentido los planes de capacitación son muy importantes en definir estrategias de emergencia y aplicación de simulacros para que la población aumente su capacidad de respuesta ante una eventual inundación. Tampoco existen grupos de emergencia.

La capacidad de respuesta también se ve reducida por la falta de fuentes de recursos accesibles a esta comunidad. Los subsidios a que pueden tener accesos son los que brinda la alcaldía de Bogotá y no hay planes locales. No hay posibilidad individual de endeudamiento o de amparo mediante pólizas.

Los anteriores elementos permiten definir los objetivos que se deben plantear en los planes de capacitación y socialización del SAT, los cuales se resumen así:

1. Socialización de los resultados de los diferentes estudios que se han elaborado en la zona.
2. Identificación por parte de la población de las zonas más vulnerables y de las zonas más seguras a donde pueden acudir en caso de que se presente un evento de inundación.
3. Capacitar a la población en el tema de inundaciones, en particular se debe dar énfasis a que la población identifique los factores que inducen a la generación de estos procesos, tal como las talas de árboles, las quemas, el vertimiento de residuos sólidos dentro de las quebradas etc.
4. Implementar planes que permitan generar o fortalecer la cooperación y participación comunitaria.
5. Establecer e implementar estrategias para que las actividades del CLE sean conocidos y aplicados por toda la comunidad no sólo por aquellos que asisten al comité.
6. Las anteriores recomendaciones se pueden ver favorecidas por la vinculación de las personas de mayor reconocimiento en la población, quienes pueden ayudar a atraer a los habitantes a este tipo de actividad y a transmitir la información esencial para el adecuado funcionamiento de grupos de emergencia, planes de emergencia, planes de alerta, etc.
7. Identificar e implementar proyectos participativos que busquen favorecer las condiciones adversas contra inundaciones y en general contra amenazas naturales. Por ejemplo campañas de limpieza, campañas de mantenimiento de la infraestructura, etc.
8. Implementar cursos de capacitación relacionados con técnicas de construcción de obras de mitigación en los predios en zonas de riesgo. Por ejemplo la construcción de barreras como diques que incrementen la capacidad hidráulica de los cauces.
9. Involucrar y capacitar a la población en los sistemas de alerta. Aunque la respuesta de las cuencas es muy rápida, la participación de la comunidad en actividades de monitores y comunicación de amenazas naturales permite incrementar su capacidad de respuesta.

Adicionalmente se recomienda el establecimiento de arreglos organizativos eficientes que permitan la oportuna transferencia de información entre las

instituciones que participan en el estudio de amenaza y vulnerabilidad, con el fin de unificar criterios y hacer más fácil el acceso a la información a la hora de emprender nuevas investigaciones.

Igualmente, se recomienda un adecuado almacenamiento de la información, con el fin de que sea de fácil acceso para las instituciones gubernamentales, la comunidad y demás entidades interesadas en el tema. En este sentido, debe hacerse una socialización de los resultados con todos los actores involucrados y principalmente con la comunidad.

Seguimiento y alerta

En este sentido, se hace necesario en primera instancia el establecimiento de un sistema de monitoreo de parámetros hidrológicos y registro de eventos que permita definir condiciones críticas y que contribuya con el desarrollo del Seguimiento y Alerta que constituyen el componente fundamental del sistema. Las recomendaciones aquí presentadas están basadas en la lista de verificación propuesta por las Naciones Unidas que se encuentra en el Anexo F-2.

La zona de estudio cuenta en la actualidad con cuatro estaciones de monitoreo de parámetros hidrológicos en funcionamiento, a partir de las cuales se puede empezar a direccionar el diseño de un Sistema de Alerta. Dos de las estaciones están a cargo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB y las otras dos son propiedad de la DPAE. Las estaciones a cargo del acueducto se describen en el Capítulo 7; de manera general se puede mencionar que en el sector denominado El Delirio se cuenta con pluviómetro y pluviógrafo para medición de precipitaciones y con Limnómetro para medición de niveles fluviales (Fotografía 9 - 1.); por otra parte, en el sector de Vitelma se cuenta con una estación pluviográfica para medición de precipitaciones. El registro de los datos en las estaciones mencionadas es llevado a cabo por guardabosques de la empresa y ningún dato es transmitido en tiempo real.

En cuanto a las estaciones propiedad de la DPAE⁴; son dos estaciones pluviométricas con transmisión de datos telemétricos que registran datos de precipitación en intervalos de 10 minutos y cuya transmisión se recibe en la DPAE cada 15 minutos vía UHF. En la Tabla 9-1 se encuentran los datos de ubicación de dichas estaciones.

⁴ Proaño López F. (2001). Monitoreo hidrometeorológico de los cerros sur orientales de Bogotá D.C. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE. Bogotá, Colombia.

NOMBRE	MUNICIPIO	LONGITUD	LATITUD	ELEVACIÓN
VITELMA	BOGOTÁ D.C.	-74.071778	4.575278	2802
DECANTADOR	BOGOTÁ D.C.	-74.068556	4.571611	2799

Tabla 9-1. Datos estaciones DPAAE



a.) Limnómetro



b.) Estación Pluviográfica

Fotografía 9 - 1. Estación de medición El Delirio.

Características técnicas

La red de estaciones automáticas está conformada por los siguientes componentes:

1. Estaciones de campo con sensores de precipitación.
2. Sistema de transmisión vía radio.
3. Sistemas de recepción y manejo de la información en la oficina de la DPAAE.

Es importante aclarar que las características aquí mencionadas corresponden a las estaciones de la DPAAE que actualmente se encuentran en la zona de estudio. La automatización propuesta para las estaciones del acueducto puede corresponder a equipo de distintas características.

Estación de campo

Los componentes de la estación de campo son:

- **PLATAFORMA COLECTOR DE DATOS:** Constituida por tarjetas intercambiables con capacidad de entrada de ocho canales dedicados para sensores de tipo análogo, digital, frecuencia y sensor de lluvia. Está provista del software necesario que permite la realización de las funciones requeridas en el proceso de entrada y salida de los datos suministrado por los sensores, hacer mediciones continuas y procesarlas para obtener valores representativos de interés, intervalos de medidas, comprobar los límites altos, bajos y la amplitud de cambio del dato. El software de programación de las estaciones de campo es de carácter generalizado que permite la inscripción o configuración de los sensores instalados actualmente, los que se puedan instalar en el futuro y las variables de alarma.

La estación puede programarse para recibir, almacenar y enviar datos en los intervalos de tiempo que se requieran.

El software es compatible con cualquier sistema de comunicación.

El almacenamiento de la información en memoria está programado para tres meses como mínimo para que en caso de falla en la comunicación se obtenga a través de un computador portátil.

- **SISTEMA DE COMUNICACIONES:** Se realiza por vía radio en UHF. El sistema transmisor está incorporado a la plataforma colector de datos, permite ser usado como sistema repetidor con el objeto de hacer sondeo sobre el sistema de recepción con las estaciones de campo. La antena es tipo vela y es la adecuada para este tipo de comunicación.
- **SENSORES:** El sensor de precipitación es tipo balancín, con una resolución de 0.1 mm por volteo.
- **SISTEMA DE ALIMENTACIÓN (Unidad de Poder):** La estación de campo está alimentada por batería de 12 voltios que permite su operación continua y alimentación del sistema de comunicación y sensores instalados mediante batería, regulador y panel solar para recargar la batería.

Sistema de transmisión

La transmisión de datos es en tiempo real y se hace mediante el sistema de radio en banda UHF.

Sistema de recepción

Los componentes del sistema de recepción son:

- **SISTEMA DE COMUNICACIONES:** Compuesto por antena y radio módem de recepción que permite interactuar con las estaciones de campo.
- **HARDWARE:** Compuesto por computador, pantalla e impresora, para el almacenamiento de la información, configuración de estaciones y sistema de comunicaciones.
- **SOFTWARE (Tipo flotante):** Para la configuración de estaciones, almacenamiento y exportación de la información y para la manipulación de los datos en los puestos de trabajo que permite el manejo de la información ordenadamente para su visualización, procesamiento, graficación e impresión y realización de estadísticas en serie de tiempos.

Una vez realizada la modelación hidrológica y teniendo en cuenta los tiempos de respuesta de la cuenca, se determinó que el monitoreo de parámetros debe ser enfocado específicamente a datos de precipitación en la parte alta de la cuenca. Además, se propone un monitoreo dirigido a establecer las condiciones de los afluentes Ramajal y La Pichosa por presentar alto impacto en la modelación.

Los resultados de la modelación del flujo y los análisis de amenaza muestran que en la parte alta por tener un cauce bastante amplio los niveles no cambian significativamente como para que sirvan de indicador para una alerta. Por el contrario, se observó que en la parte baja que a medida que se aumentan los caudales el cauce responde con flujos que aumentan su profundidad y velocidad, de manera que es más efectivo el monitoreo de la corriente en la parte baja. En este sentido es recomendable implementar un plan de apoyo comunitario para la lectura de las miras que se encuentran en el vertedero de la Estación El Delirio, En la Carrera 8ª A ESTE con calle 13 sur (Instituto de ciegos) y en el puente del parque San Cristóbal en la Transversal 1ª A ESTE con calle 12 sur. Estas dos últimas se encuentran entre las entregas de las Quebradas El Triangulo y Ramajal.

Como se menciona anteriormente, para pensar en la implementación de un SAT que se ajuste al modelo descrito en el documento, se debe iniciar con el establecimiento de un sistema de monitoreo de parámetros hidrológicos en tiempo real y registro de eventos asociados que permita determinar las condiciones críticas presentes en el área de estudio. En este sentido, y con el fin de monitorear precipitaciones en la parte alta de la cuenca se propone la adecuación de dos sitios de monitoreo, para la instalación de nuevos equipos telemétricos o la reubicación de los existentes. Los sitios propuestos son: la antigua estación de La Maria jurisdicción de la EAAB y el Cerro de La Teta, cuyo objetivo es el de establecer las condiciones que afectan directamente a los afluentes Ramajal y La

Pichosa. Adicionalmente, se propone la automatización de los equipos de medición que se encuentran en El Delirio.

Para efectuar una primera aproximación en toma de decisión acerca de si es necesario implementar nuevas estaciones de registro automático en zonas más alta de la cuenca que puedan conectarse al sistema de alertas a implementar, se empleó información recopilada para el proyecto de investigación “*Desarrollo de modelos conceptuales y computacionales para simular estocásticamente la dinámica espacio-temporal de la precipitación en Bogotá*”, que adelanta Fabio Bernal (miembro del equipo que desarrolló este trabajo), en este caso se cuenta con información pluviográfica cada 30 minutos de lluvia para estaciones cercanas a la cuenca de interés, particularmente en las estaciones Vitelma, el Delirio, Santa Lucía y el Granizo, en el periodo 1995 a 1999, con esta información se estimaron las siguientes probabilidades como elementos descriptivos de la simultaneidad de la lluvia en las estaciones existentes cercanas a la estación automática perteneciente a la DPAE.

Las probabilidades estimadas están asociadas a los periodos 30 minutos en los que se presenta precipitación en la estación Vitelma y si:

- a) Se presenta lluvia simultánea en cada una de las estaciones.
- b) Se presentó lluvia en la media hora anterior en cada una de las tres estaciones.
- c) Se presentó lluvia en la hora anterior en cada una de las tres estaciones.
- d) Se presentó lluvia en los 90 minutos anteriores en cada una de las tres estaciones.
- e) Se presentó lluvia en las 2 horas anteriores en cada una de las tres estaciones.
- f) Se presentó lluvia en las 4 horas anteriores en cada una de las tres estaciones.

Se asume que la lluvia puede tener cualquier magnitud para este estimativo.

Se efectuó un segundo estimativo considerando la precipitación total por eventos de lluvia, en este la probabilidad corresponde a si se presentó precipitación sobre la estación Vitelma y se registró precipitación durante el mismo evento en cada una de las 3 estaciones restantes, las probabilidades obtenidas se presentan a continuación en la Tabla 9-6.

De las probabilidades anteriores puede apreciarse que en las estaciones ubicadas hacia aguas arriba de la estación Vitelma, Delirio y Granizo (aunque ésta última se encuentra fuera de la cuenca, está ubicada en la parte alta de la zona oriental), se

presenta probabilidad simultaneidad de lluvia en intervalos de tiempo de 30 minutos de 58% en la estación el Delirio y de 49% en la estación Granizo, la probabilidad de que se presente lluvia dado que se presentó lluvia en 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 4.0 horas desciende desde el 50% hasta el 28 % en la estación el Delirio, y para la estación el Granizo entre 49% y 33%, lo que indica que hay más probabilidad de que se presente lluvia antecedente en la estación Granizo que en la estación el Delirio, la probabilidad en el caso de la Estación Casablanca se reduce notablemente, indicando que el desarrollo de eventos de precipitación tiene una mayor incidencia hacia la zona montañosa debido al efecto orográfico.

Probabilidad de que llueva en la estación: /dado que se registró lluvia en la estación Vitelma	Estación Delirio	Estación Santa Lucia	Estación Granizo
Probabilidad de lluvia en el mismo intervalo de tiempo	0.58	0.4	0.49
Probabilidad de lluvia dado que llovió en los 30 minutos anteriores.	0.5	0.36	0.49
Probabilidad de lluvia dado que llovió en la hora anterior.	0.46	0.32	0.49
Probabilidad de lluvia dado que llovió en las 1.5 horas anteriores.	0.42	0.3	0.47
Probabilidad de lluvia dado que llovió en las 2 horas anteriores.	0.39	0.27	0.45
Probabilidad de lluvia dado que llovió en las 4 horas anteriores.	0.28	0.18	0.33
Probabilidad por eventos			
Probabilidad de que se registre lluvia en un evento en la estación dada, si se presentó lluvia en un evento en la estación Vitelma	0.83	0.89	0.81

Tabla 9-2. Probabilidades.

Estas probabilidades tienen importancia a la hora de pretender implementar un sistema de información que permita evaluar o estimar condiciones de lluvia críticas mediante un modelo lluvia escorrentía, un modelo de predicción estocástico, o cualquier otra alternativa que requiera información robusta para su calibración.

Cuando se tiene en cuenta la probabilidad por evento se evidencia que aunque la probabilidad de simultaneidad de registro en por lo menos 30 minutos en las estaciones de referencia es superior al 80 % en todos los casos, el tener una estación automática en el Delirio no garantiza que todos los eventos que producen precipitación en la cuenca sean registrados, ya que no cubre en totalidad lo que sucede en la cuenca alta, aunque esta consideración puede no ser válida para

eventos de tormenta con precipitaciones superiores a 10mm, el análisis respalda la consideración de implementar una nueva estación automática en los sitios el Delirio o la María, con el fin de evaluar con información sólida y decidir sobre la determinación de umbrales de precipitación para emisión de alertas con intervalos de tiempo que dependen del tiempo de concentración del cauce entre estos sitios y las zonas urbana que puede ser afectadas por inundaciones.

Se puede sugerir a partir de la información anterior que es recomendable instalar una nueva estación de registro automático en La María, con especificaciones similares a las que ya se cuenta. Se prefiere La María que El Delirio porque amplía la cobertura espacial y puede servir en el futuro para mejorar los niveles de alerta que se proponen posteriormente.

Con el fin de involucrar a la comunidad en el SAT se recomienda que dentro del programa de capacitación se instale una estación pluviométrica simple en la cabecera de la quebrada La Pichosa. Para este instrumento se puede solicitar a la comunidad la lectura cada seis horas y su reporte periódico a la DPAE vía formato. En el caso de que los registros telemétricos definan una alerta verde se puede intensificar la frecuencia de lecturas a cada hora y reporte inmediato vía telefónica a la DPAE, estos datos pueden ser utilizados como complemento de los datos automáticos y en especial para establecer un sistema de comunicación directa con la comunidad en caso de que el nivel de alerta se incremente.

Niveles de alerta

Debido a la escasa información en relación con la fecha de ocurrencia de los eventos de inundación y flujo identificados en la zona de estudio es imposible en este momento establecer una relación directa entre los niveles de lluvia y la ocurrencia de inundaciones y flujos. En la literatura técnica consultada y que se resume en los Anexos A-3 y A-4, se establecen los niveles de alerta de flujos de detritos en función de los niveles de lluvia capaces de generar deslizamientos superficiales.

Para definir una herramienta de seguimiento para determinar la posibilidad de ocurrencia de potenciales procesos de inundación o flujo se hizo primero un análisis de relación lluvia deslizamientos, con base en los casos históricos de deslizamientos en la zona a los cuales se les pudo determinar la fecha de ocurrencia. Las Figuras 9-12 a 9-14 muestran estas relaciones para diferentes combinaciones de lluvias antecedentes y detonantes de acuerdo con la propuesta de diferentes autores (Cuadros y Sisa, 2003).

En las gráficas se observa que hay una mayor concentración de procesos para altos niveles de lluvias antecedentes, sin embargo no es sencillo establecer algún tipo de relación de carácter predictivo. Se ve que no es necesario en todos los casos grandes volúmenes de lluvia antecedente para la generación de

deslizamientos. Tampoco es evidente la relación de los procesos solamente con una lluvia de evento de gran intensidad.

Revisando la concentración de puntos en las diferentes gráficas se podría proponer algunas combinaciones con el fin de hacer seguimiento a este tipo de procesos, tal como los mostrados en la Tabla 9-3.

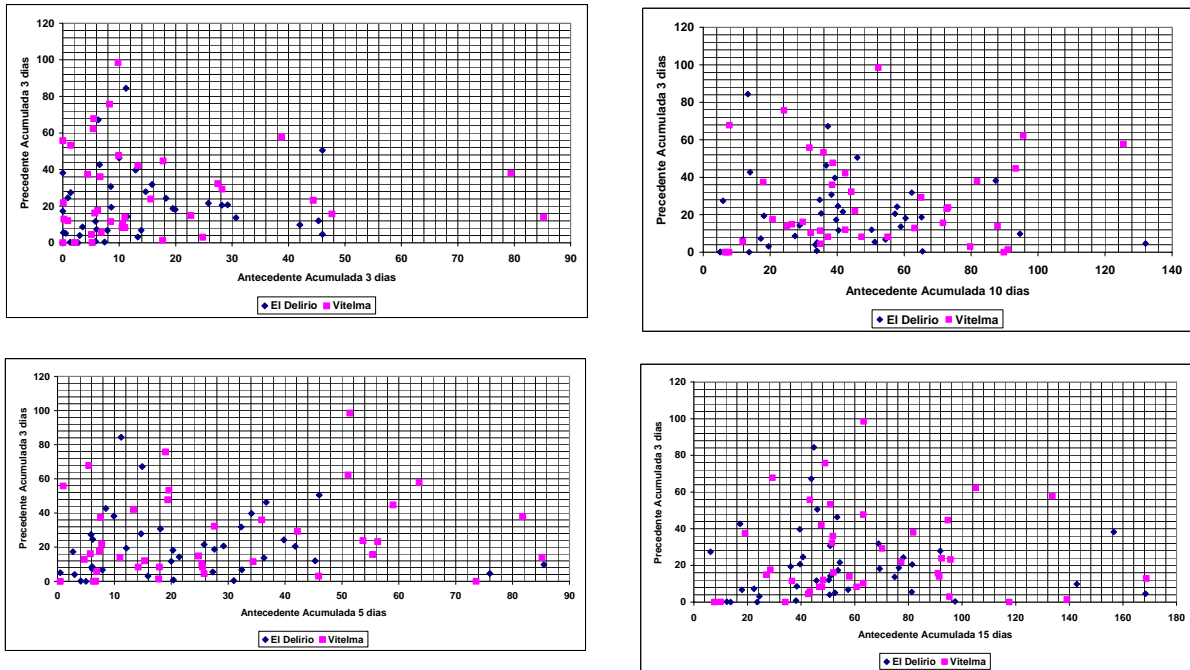


Figura 9-12. Relación entre lluvias antecedentes para periodos de 3 a 15 días contra lluvia de evento de 3 días. Los puntos representan los casos de deslizamiento reportados en la base de datos del SIRE en la zona de San Cristóbal.

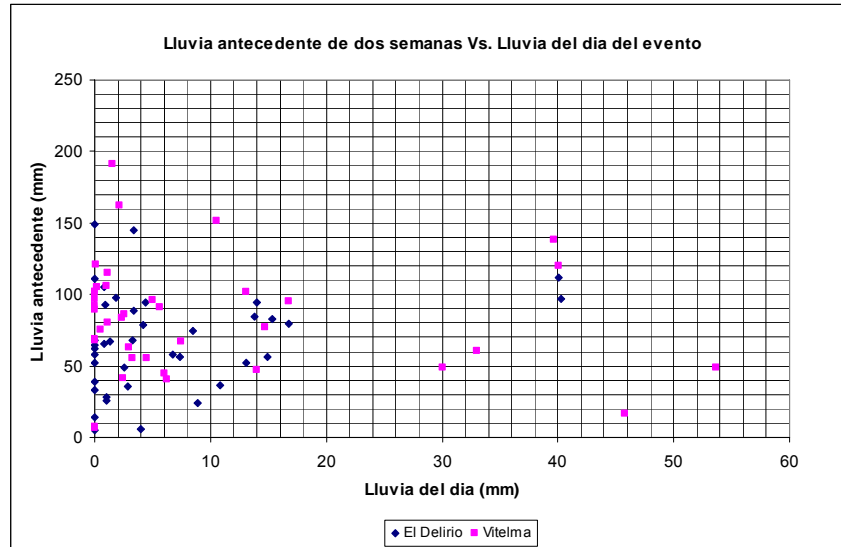


Figura 9-13. Relación lluvias antecedentes para un periodo de 15 días contra lluvia diaria, de acuerdo con la propuesta de Aboshi. Los puntos representan deslizamientos en la base de datos del SIRE para la zona de San Cristóbal.

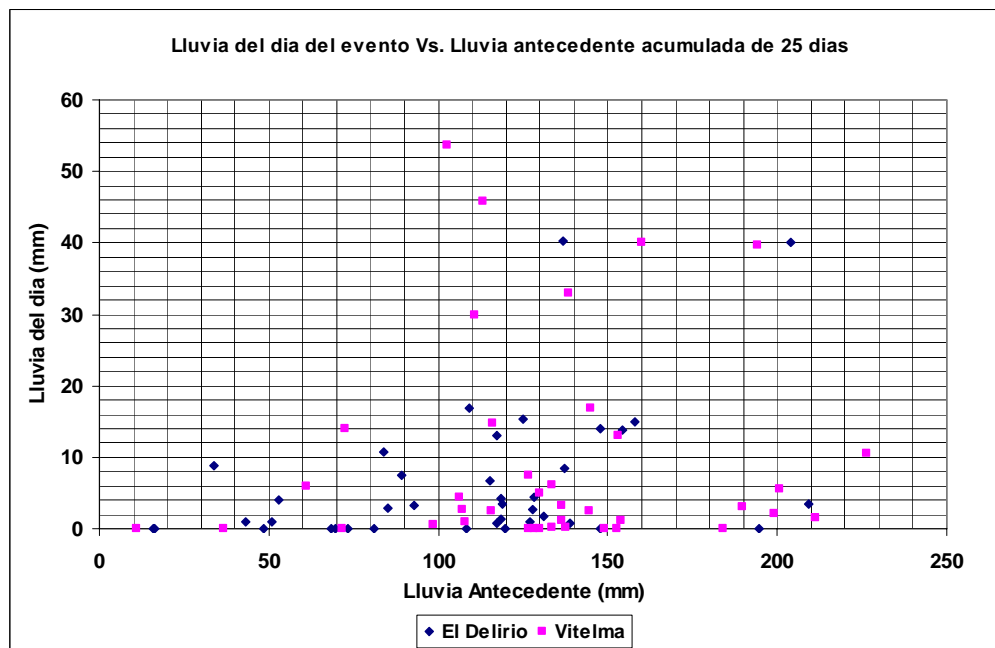


Figura 9-14. Relación entre lluvias antecedentes de 25 días y la lluvia diaria, de acuerdo con la propuesta de Tercien. Los puntos representan deslizamientos en la base de datos del SIRE en la zona de San Cristóbal.

Relación	Lluvia antecedente	Lluvia de evento
Figura 9-12.	15 días >35 mm	3 días >5 mm
Figura 9-13	15 días >30 mm	1 día >0
Figura 9-14	25 días >100 mm	1 día >0

Tabla 9-3. Valores mínimos de lluvias antecedentes y lluvias de evento para inducir deslizamientos en la zona.

A pesar de la gran dispersión de los datos, se puede ver, de la Tabla 9-3, que para la zona son más importantes las lluvias antecedentes que las lluvias cortas. Es importante ver como entre 15 y 25 días de lluvias antecedentes hay un aumento de lluvia del orden de 70 mm para la generación de deslizamientos, lo que puede indicar que las lluvias del mes anterior pueden ser más importantes que las de las dos semanas anteriores. Esto puede ser útil en términos de seguimiento porque se pueden establecer diferentes niveles de alerta, uno a partir de 30 mm en 15 días y otro de 100 mm en 25 días.

Para complementar los resultados anteriores se modeló a partir de la propuesta de Pradel y Raad (1993) el proceso de infiltración del agua desde la superficie, en este caso se trabajó con los datos presentados en la Tabla 9-4. Los resultados se presentan en las figuras 9-15 y 9-16.

Unidad superficial	Clasificación	μ	Ψ (mm)*
Qc1	SW	0.0405	49.5
Qc2	CL	0.0170	292.2
Qrc	SM	0.0313	61.3

Tabla 9-4. Valores adoptados para los parámetros de humedad y succión en el frente húmedo para las diferentes unidades superficiales.

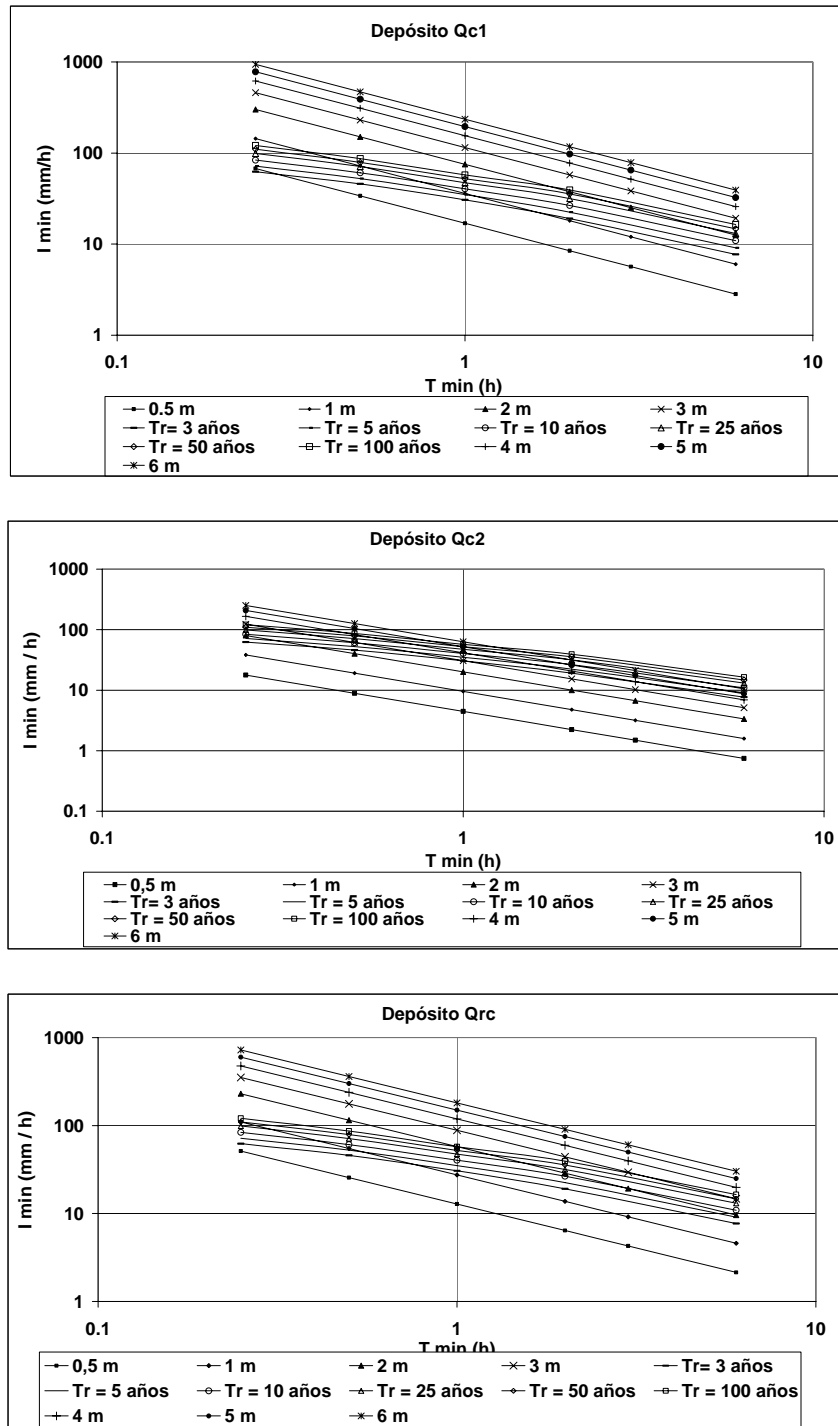


Figura 9-15. Valores de intensidad y duración mínima de lluvias requeridas para producir la saturación del suelo a diferentes profundidades.

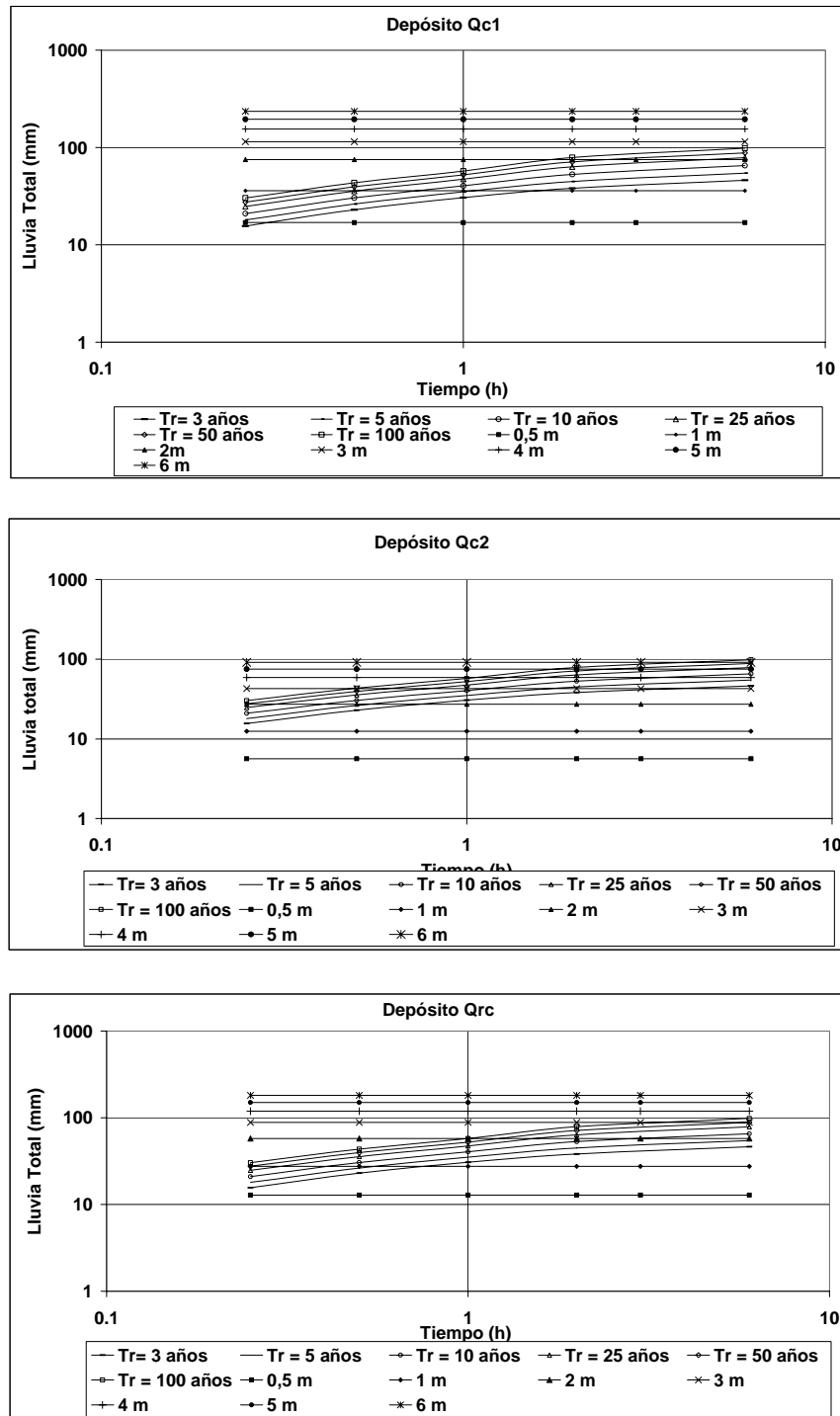


Figura 9-16. Valores de lluvia total y duración requeridos para la saturación del suelo a diferentes profundidades.

Las gráficas anteriores muestran que las lluvias intensas de la zona sólo pueden llevar a saturar las capas más superficiales del suelo, esto es entre dos y tres metros, lo que sugiere que los procesos de inestabilidad superficial, durante intensa lluvias, están asociados con el avance del frente húmedo más que con el incremento del nivel freático.

Los dos análisis anteriores llevan a concluir que los procesos de inestabilidad en la zona están condicionados por las lluvias antecedentes del orden de 25 días, sin embargo el evento detonante está relacionado con lluvias intensas que logren saturar el suelo hasta una profundidad entre 2 y 3 m. Más del 70 % de los deslizamientos inventariados en la zona presentan profundidades menores a 2 m, lo que refuerza la idea de que el proceso de inestabilidad crítico es la falla planar, traslacional superficial inducida por lluvias intensas.

Debido a que no se obtuvo información para relacionar eventos pasados de flujos e inundaciones, como umbrales de alerta se sugiere tomar los que se deducen de los análisis anteriores relacionados con la generación de deslizamientos en la cuenca. Los criterios sugeridos para los diferentes niveles de alerta se consigan en la Tabla 9-5.

Nivel de alerta	Criterio general	Criterio particular	Acciones
Verde	Lluvias antecedentes	Lluvia de 25 días antecedentes >100 mm	Seguimiento de lluvias de 6 horas Observación de los niveles en El Delirio Observación por parte de la comunidad de niveles de cauce en la parte baja. Campañas de limpieza del cauce y estructuras hidráulicas
Amarillo	Lluvias de evento	Lluvias de 6 horas sobrepasa la curva IDF de 25 años	Seguimiento de las quebradas por parte de los Bomberos

Tabla 9-5. Criterios sugeridos para diferentes niveles de alerta.

Para la alerta naranja se recomienda el seguimiento directo de las tasa de ascenso de los niveles de las quebradas y la intensidad horaria de las lluvias. Desafortunadamente es difícil establecer algún criterio específico sin que sea especulativo.

Con relación a los niveles críticos de las miras se puede asumir un criterio subjetivo como aquel en que se copa la mitad de la capacidad de la sección del cauce en los sitios de mira. También se debe observar el cambio en la turbiedad del flujo y transporte de detritos extraños como ramas.

Difusión y comunicación

Es importante establecer una cadena de difusión de alertas mediante políticas gubernamentales o legislación, con el fin de institucionalizar e integrar los procesos que llevan a cabo los diferentes organismos encargados de la prevención de emergencias, tanto a nivel local como a nivel nacional. Así mismo, es importante la habilitación de autoridades reconocidas para difundir los mensajes de alerta y definir las funciones y responsabilidades de cada una de ellas en el proceso de difusión.

La difusión de las alertas debe ser adaptada a las características propias de las comunidades en riesgo, es decir, la capacidad que se tiene de acceder a la información a través sistemas de comunicación tales como medios masivos y de comunicación informal, así como el nivel educativo y de formación cultural respecto al tema. De igual forma, es necesario utilizar múltiples medios de comunicación para la difusión de las alertas.

Al igual que con el monitoreo, es importante implementar sistemas de mantenimiento y modernización de equipos para tener sistemas de apoyo en la fase de comunicación.

La definición de niveles de alerta, contribuye con la capacidad de respuesta de la comunidad y con la credibilidad misma del sistema. Por tal motivo, es indispensable emitir alertas claramente identificables y coherentes en el transcurso del tiempo. De la misma manera como es importante avisar a la comunidad acerca de la inminencia de un evento, es también importante establecer mecanismos para informar a la comunidad que la amenaza ha pasado.

El siguiente es la secuencia de información y comunicaciones recomendado para la difusión de las alertas, se identifican también los actores que hacen parte del sistema de comunicación:

Origen de información	Medio de comunicación	Receptor de información	Acciones
Estación automática	UHV	DPAE Analista de datos de lluvia	Seguimiento de los niveles de lluvia (secuencias de 25 días antecedentes, secuencias de 6 horas) Mensajes preventivos Mensajes de alerta
DPAE	Radio	Bomberos CLE Alcaldía Local Representantes de la comunidad Instituciones Nacionales (Defensa civil, policía, etc.) Instituciones regionales (CAR, EAAB, etc.)	Monitoreo visual de las quebradas y campañas de limpieza. Mensajes de alerta Informar a la comunidad para intensificar monitoreo de lluvias y niveles de las quebradas
Juntas de acción comunal	Perifoneo Sirenas	Comunidad en general	Aplicación de protocolos de protección personal y de bienes Aplicación de protocolos de evacuación

Tabla 9-6. Secuencia de información y comunicaciones recomendado para la difusión de las alertas

Respuesta

Una vez se genera una alerta se deben seguir los protocolos disponibles por parte de la DPAE para la atención de emergencias. Aunque ya existen esos protocolos y normatividad al respecto, cabe mencionar algunas recomendaciones con el fin de optimizar las capacidades de respuesta no sólo de la entidad encargada de atender la emergencia, sino la capacidad de la comunidad a responder ante un evento.

La capacidad de respuesta de la comunidad aumenta en el sentido en que las alertas que se reciben sean respetadas y la emisión de ésta provenga de fuentes fidedignas y que cuenten con cierto nivel de credibilidad entre la población en riesgo, por tal motivo, la entidad debe desarrollar estrategias para infundir confianza en las alertas, reduciendo al mínimo las falsas alarmas y la comunicación de las mejoras para mantenerla.

La realización periódica de pruebas y simulacros para comprobar la eficacia de los procesos de difusión de alertas tempranas y las respuestas, es un complemento importante a la hora de establecer la capacidad de respuesta de la comunidad. Igualmente, es importante incorporar las lecciones aprendidas frente a la respuesta en ocasiones anteriores, para el desarrollo de estrategias futuras.

Es importante educar a la comunidad acerca de la forma en que se difundirán las alertas, sobre los medios que son fiables y sobre la forma de responder a las amenazas tras recibir los mensajes de alerta temprana.

Concientizar a la comunidad a través de la utilización de medios masivos, populares o alternativos de comunicación contribuye con el incremento de la respuesta.

9.2 Identificación de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar la vulnerabilidad por inundaciones en la cuenca alta del Río San Cristóbal

De acuerdo con la normatividad vigente en Bogotá, decreto 190 de 2004 compilatorio del POT, se establece la definición de zona de ronda y zona de manejo y preservación ambiental, que aplica actualmente y que permite establecer las acciones y estrategias a implementar para la reducción del riesgo por inundación. Estas definiciones son las siguientes:

- *Ronda hidráulica*: Zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de áreas máximas (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y la restauración ecológica.
- *Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA)*: Es la franja de terreno de propiedad pública o privada contigua a la ronda hidráulica, destinada principalmente a propiciar la adecuada transición de la ciudad construida a la estructura ecológica, la restauración ecológica y la construcción de la infraestructura para el uso público ligado a la defensa y control del sistema hídrico.

Se pretende en este componente establecer e identificar los sitios y medidas estructurales recomendables para efectuar la mitigación del riesgo por inundaciones y flujos, se evaluará el escenario de la zona inundable para el periodo de retorno de 10 años definido para la ZMPA, como zona de atención prioritaria y también se tendrá en cuenta en esta identificación el área cubierta por la creciente del periodo de retorno de 100 años establecido por lineamientos internacionales, particularmente para nuevos desarrollos. Adicionalmente se tomará en cuenta los resultados de los análisis de amenaza y riesgo descritos en el Capítulo 8 para una profundidad de 1.0m como parámetro sugerido de análisis.

Para tener una mejor comprensión de las imágenes de los mapas se presenta a continuación las convenciones y los rangos de probabilidad y valores utilizados para amenaza, riesgo social y riesgo económico.














Amenaza	Riesgo Social	Riesgo económico
Probabilidad	Personas afectadas	\$
 0 - 0,12	 0,1 - 2	 0 - 25.000
 0,12 - 0,44	 2 - 4	 25.000 - 50.000
 0,44 - 1	 4 - 6	 50.000 - 75.000
	 6 - 8	 75.000 - 100.000
	 > 8	 > 100.000

Tabla 9-7. Convenciones de los mapas de amenaza y riesgo.

Posterior a la modelación en FLO 2D de los eventos de creciente correspondientes a periodos de retorno de 5, 10, 25 y 100 años, se superpusieron las coberturas de lotes, topografía, vías, cauces y la mancha de inundación para determinar los puntos críticos a ser atendidos mediante medidas estructurales que permitan efectuar la reducción del riesgo por inundaciones. A continuación se hace un análisis de los diferentes sectores en donde se han identificado potenciales pérdidas para definir las medidas de mitigación que se sugiere implementar.

Parte alta del Río San Cristóbal

En la modelación se obtuvo que los flujos en la parte alta del Río San Cristóbal se concentran en el cauce. Para los escenarios analizados no se identificó ninguna zona de inundación, adicionalmente por ser una zona de protección ambiental con

acceso restringido y controlada por la EAAB, el riesgo en la zona es bajo y no se requiere de intervención.

En la Figura 9-17 se presentan los mapas de amenaza y riesgo asociados con una profundidad de 1.0m de este sector. En ella se observa la concentración del flujo a lo largo del cauce y ausencia de zonas de inundación. Se puede ver adicionalmente que los tramos que muestran mayor posibilidad de que presenten alturas mayores a 1.0m están localizados en las entregas de los tributarios.

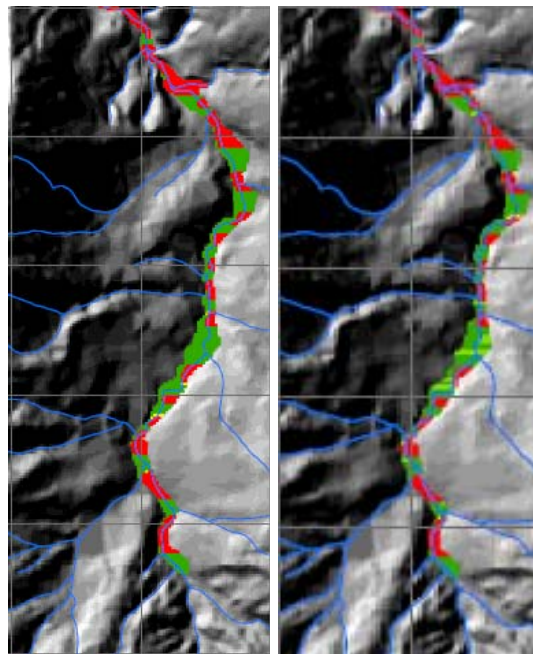


Figura 9-17. Detalle de los mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha), asociados a una profundidad de 1.0m en la parte alta y media del Río San Cristóbal.

Los valores de riesgo calculados en este sector están asociados con el costo de las zonas rurales que son cubiertas por el flujo, se tiene que estas zonas son pequeñas pero de alto costo. Por no haber viviendas en el sector en el mapa de riesgo social para una profundidad de 1.0m (Incluido en el Anexo E-1) no aparecen personas afectadas.

Medidas de mitigación

Se considera que no es necesario ningún tipo de intervención en este sector. Debido a que las secciones transversales en esta zona son suficientemente

amplias las diferencias de nivel entre los diferentes periodos de retorno no son significativos, no es una zona adecuada para considerar monitoreo de niveles de flujo para un SAT.

En el sector de La María se recomienda la instalación de una estación telemétrica que sirva de apoyo en el monitoreo de un SAT de la parte baja de la cuenca, tal como se analizó anteriormente.

Parte media del Río San Cristóbal

La parte media del Río San Cristóbal esta asociada con el flujo a lo largo de un sector en donde el lecho y las bancas del cauce son en roca intensamente plegada y fracturada, tal como se describió en el estudio de geología. En la Figura 9-18 se presentan los mapas de amenaza y riesgo de este sector, en donde se aprecia que existe una alta posibilidad de profundidades de flujo altas, esto debido a que por ser en roca se presenta un estrechamiento en la sección del cauce.

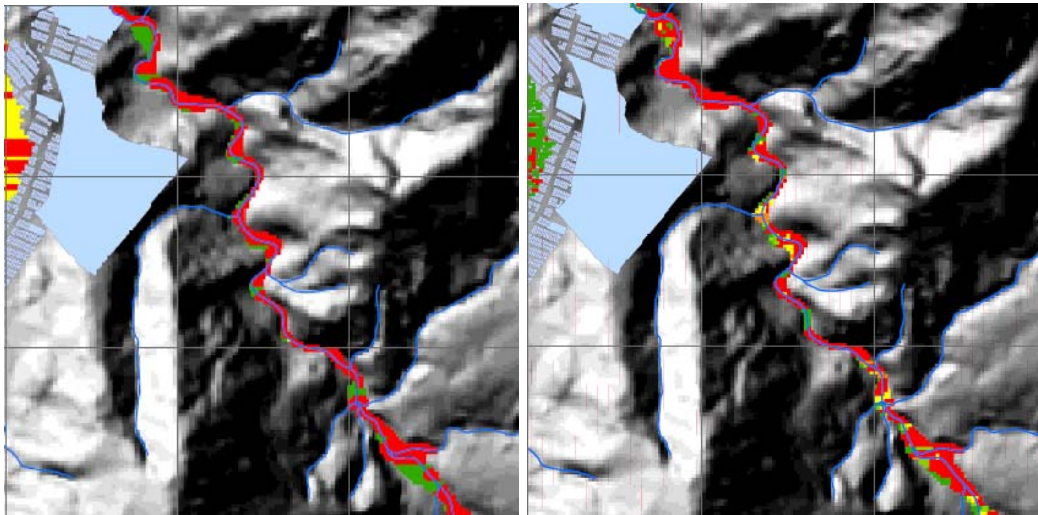


Figura 9-18. Mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha) para la parte media del Río San Cristóbal.

Al igual que en la parte alta de la cuenca se tiene que el riesgo asociado está relacionado con el costo de los predios rurales.

Mirando los análisis de velocidad, se tiene que en este sector se presentan altas velocidades asociadas con el estrechamiento de la sección, sin embargo el flujo por transitar sobre material rocoso no se esperan problemas de socavación de fondo o lateral significativas. En este sector tampoco se presenta afectación a las personas.

Medidas de mitigación

A pesar de las altas velocidades, el control geológico en este sector permite que no se requiera ningún tipo de intervención en el sector.

Parte baja del barrio Aguas Claras a lo largo del Río San Cristóbal

En las Figuras 9-19 y 9-20 se presentan los mapas de inundación efectuados con FLO 2D (modelación sólo con agua, sin concentración de sedimentos), para periodos de retorno de 10 y 100 años. Se presentan sólo estos dos periodos de retorno puesto que la variación en cobertura espacial de la zona afectada no es considerablemente diferente entre estos dos escenarios.

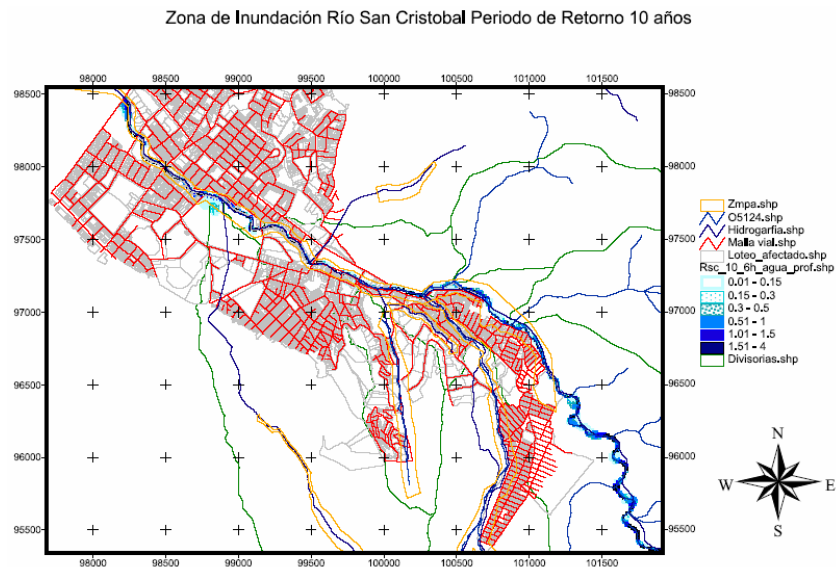


Figura 9-19. Modelación en FLO 2D de la mancha de inundación en la cuenca alta del río San Cristóbal. Periodo de retorno de 10 años.

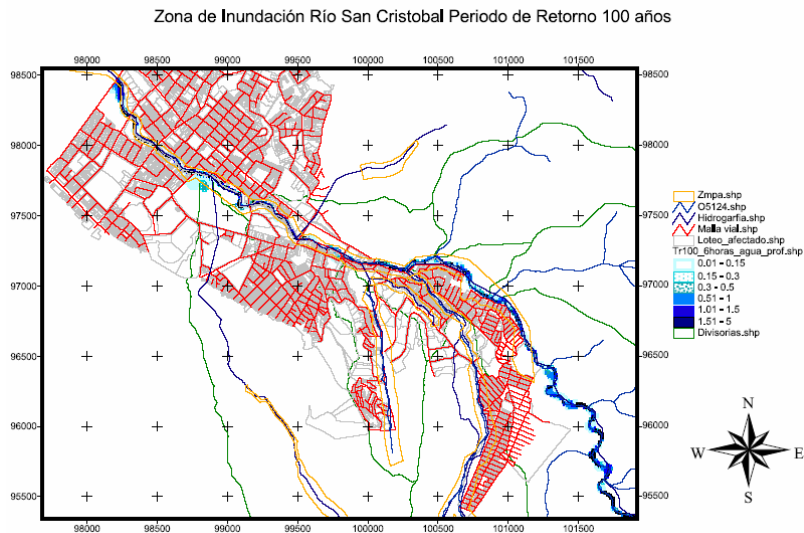


Figura 9-20. Modelación en FLO 2D de la mancha de inundación en la cuenca alta del río San Cristóbal. Periodo de retorno de 100 años.

Este sector corresponde a la parte baja del barrio Aguas Claras, la Carrera 22 Este, que es topográficamente la zona más baja de la zona urbanizada, por lo que los flujos tienden a concentrarse a lo largo de esta vía sin pavimentar, dada la existencia de andenes en la zona y la alta pendiente de las calles adyacentes, no se espera que la zona de afectación se amplíe más allá. En esta zona la densa cubierta vegetal de la ronda de la quebrada es un factor adicional que reducirá la afectación de zonas habitadas. En este sector aun no hay asentamientos urbanizados por lo que el mapa de riesgo social no muestra afectación a personas.

Medidas de mitigación

En el mapa de riesgo no se observa predios afectados en este sector, por lo tanto no se considera necesario ningún tipo de intervención especial. Se debe, sin embargo, controlar la invasión de la zona de ronda, la cual es favorecida por la presencia de la carrera 22.

Sector entre la Carrera 21B este con Calle 9B sur y la Carrera 8A

El tramo del río entre la Carrera 21B Este con Calle 9 B sur y la Carrera 8A Este con calle 12 Sur, se caracteriza por tener viviendas sobre el límite de la zona de

ronda al costado sur del cauce, muchas de ellas ubicadas en laderas de alta pendiente, separadas en algunos tramos por vías de acceso que reducen el riesgo de afectación de las viviendas. La vía de acceso al batallón de san Cristóbal se encuentra a menos de 5 metros del cauce, sin embargo el único sitio de posible afectación a este costado del río es la entrada al mismo, no existen zonas habitadas sobre este flanco del cauce.



Figura 9-21. Estado de cobertura vegetal protectora de la quebrada Aguas Claras. Sobre la calle 28 sur - Carrera 22 Este.

En las Figuras 9-22 y 9-23 se observan las zonas de inundación de este sector, en donde se ve que existe un importante número de viviendas dentro de la zona de ronda, aunque se resalta que sólo las que están cerca de la margen del río son afectadas.

La Figura 9-24 presenta los mapas de amenaza y riesgo asociados con una profundidad de 1.0m, en este caso se evidencia la concentración del flujo en el cauce y la afectación de los predios por debajo de la Carrera 8A. El mapa de riesgo social no muestra que haya afectación de personas en este tramo.

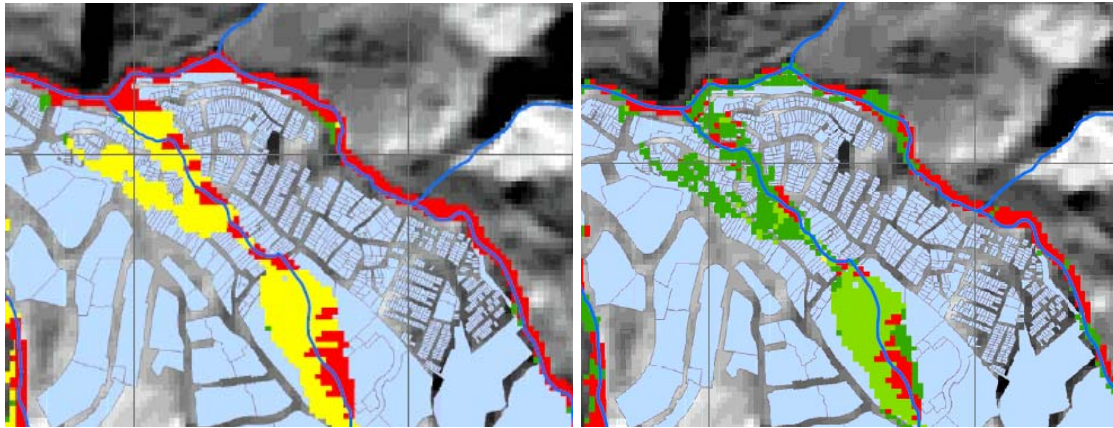


Figura 9-24. Mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha), en el sector comprendido entre la Carrera 21B este con Calle 9B sur y la Carrera 8A.

Medidas de mitigación

Se deben evitar la urbanización de los predios que están dentro de la zona de ronda y por debajo de la Carrera 8A. En los mapas de inundación se ve la alta posibilidad de que estos sean alcanzados por los flujos. Hasta el momento esos aparecen sólo como zonas verdes o predios sin urbanizar.

En el caso de que los niveles sobrepasen la capacidad del cauce en este sector, las vías paralelas al éste actuarán como canales y permitirán la evacuación del flujo. Estas vías son la Carrera 8A y el acceso al Batallón.

Tramo entre la Transversal 11 Este y la 8A este

En el tramo entre la Transversal 11 Este y la 8A este, a ambos costados del cauce existen viviendas en la zona de ronda, algunas de ellas en precarias condiciones estructurales. Teniendo en cuenta que el costado sur del cauce tiene un talud más bajo, es factible la afectación de las viviendas a este costado durante una creciente. Las fotografías 9 - 2. y 9 - 3. (carrera 8A este con calle 12 Sur), muestran esta condición, sin embargo en los mapas de amenaza y riesgo, que se presentan en la Figura 9-25, se observa que las zonas de mayor posibilidad de afectación está en las entregas de las quebradas La Pichosa y El Triángulo. Para los otros sectores dentro de la zona urbanizada los mapas de riesgo no muestran

afectaciones importantes en las edificaciones debido a que los flujos se concentran en el cauce.

La Figura 9-26 presenta un detalle del mapa de riesgo social asociados con una profundidad de 1.0m, en la que se ve que pueden verse afectados hasta dos personas en la Carrera 7 A Este con calle 13 sur.

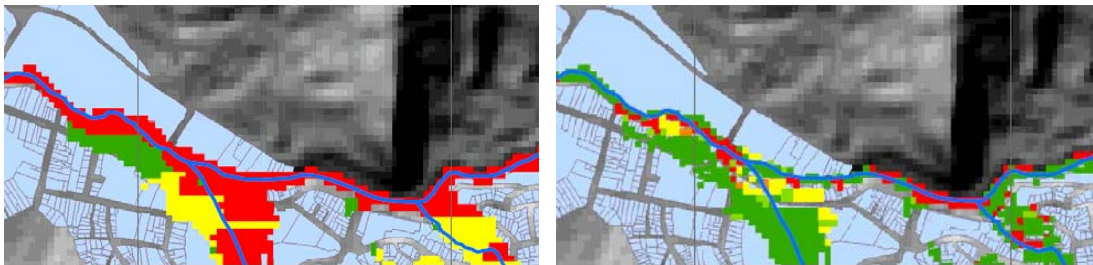


Figura 9-25. Detalle de los mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha) asociado con una profundidad de 1.0 m, en la zona entre Transversal 11 Este y Carrera 7 Este.

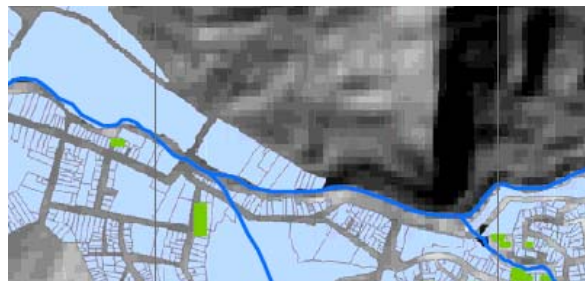


Figura 9-26. Detalle del mapa de riesgo social asociado con una profundidad de 1.0m, en la zona entre la transversal 11 Este y Carrera 7 Este.



Fotografía 9 - 2. Cruce carrera 8 A este con el río San Cristóbal: Ubicación de viviendas en la zona de ronda del cauce. Calle 12 Sur carrera 8 A este.



Fotografía 9 - 3. Cruce carrera 8 A este con el río San Cristóbal: Estructura tipo box en el cruce de carrera 8 A este con Calle 12 Sur.

Esta zona afectada presentaría profundidades cercanas a 1,0 metro en la modelación de FLO 2D para los periodos de retorno de 10 y 100 años (ver Figuras 9-27 y 9-28).

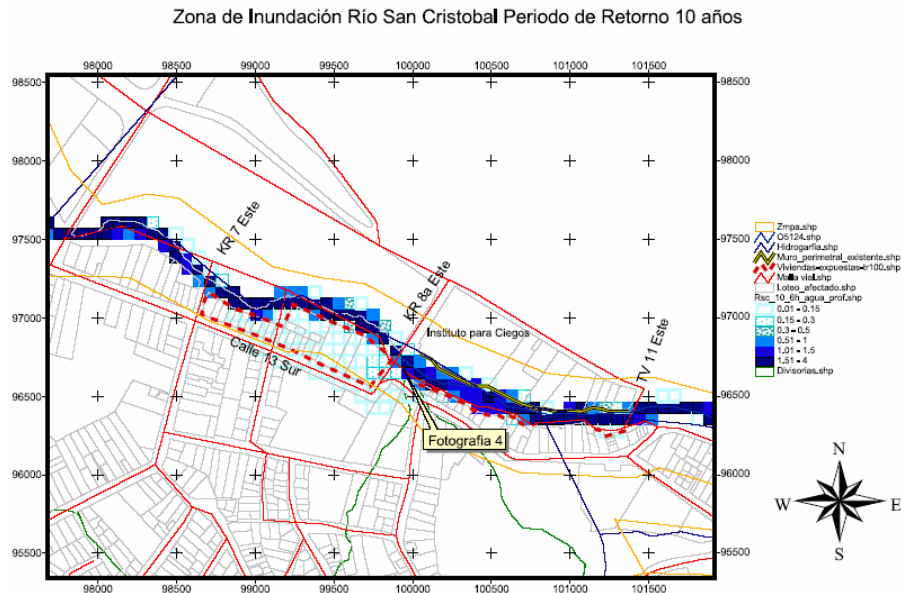


Figura 9-27. Zona afectada por inundación entre TV 11 Este y Carrera 7 Este. Periodo de retorno de 10 años

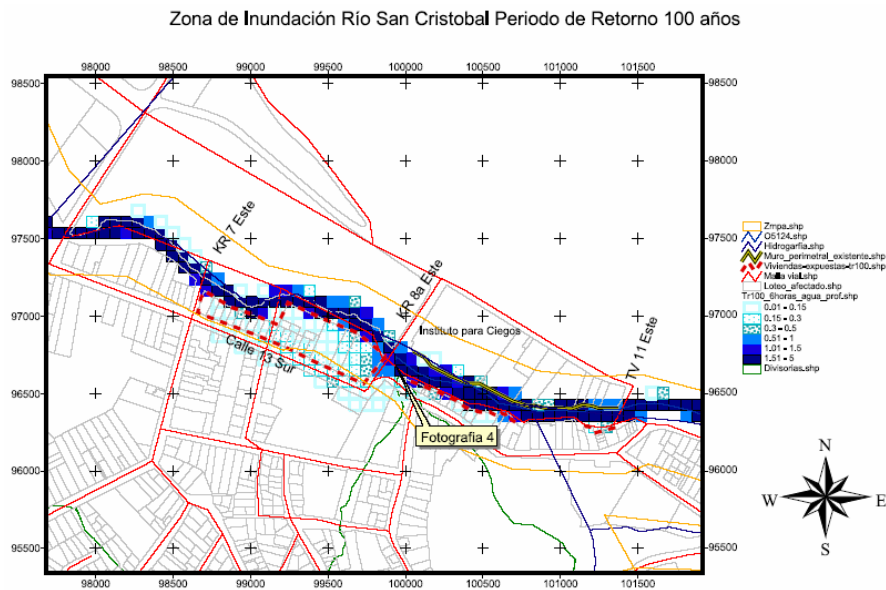


Figura 9-28. Zona afectada por inundación entre TV 11 Este y Carrera 7 Este. Periodo de retorno de 100 años

En la Figura 9-29, se presenta la condición para un periodo de retorno de 100 años incluyendo el aporte de la quebrada El Triangulo, en esta se observa que los

campañas de limpieza periódicas del cauce, principalmente antes de los periodos lluviosos.

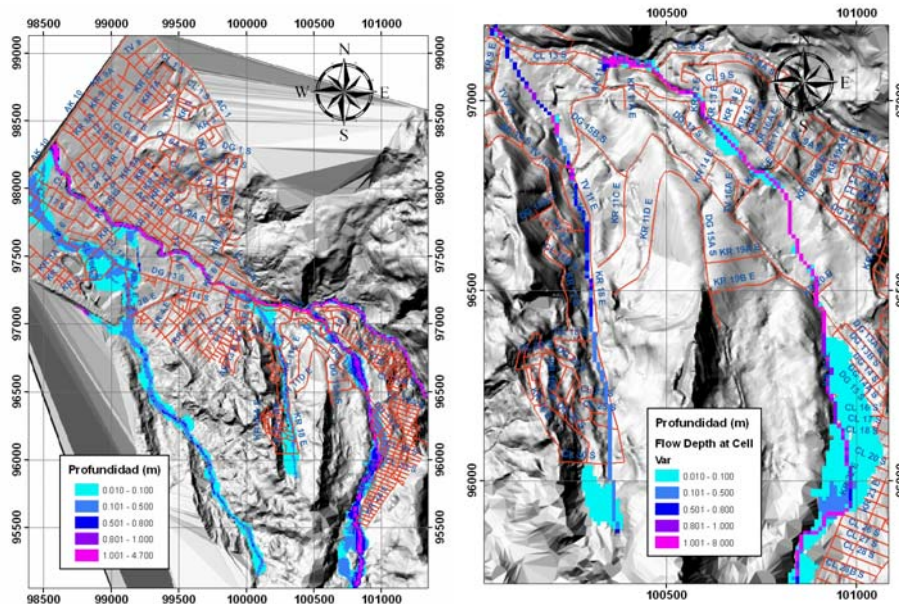


Figura 9-30. Modelación de flujos para condiciones extremas en las quebradas La Pichosa y El Triangulo.

En el mapa de amenaza se observa que la probabilidad de que el agua alcance un nivel superior a 1.0m en los predios alrededor de la Calle 13 sur es baja y en algunos puntos media. Por su parte el mapa de riesgo muestra pocos predios, con índices de riesgo social superior a 6 personas, en particular algunos aguas debajo de la entrega de la quebrada El Triangulo y entre la carreras 8 y 7A este, estos predios están localizados a lo largo de la quebrada. Los predios entre la Calle 13 sur y la quebrada presentan niveles de riesgo bajo y medio.

Medidas de mitigación

De manera general debe prevenirse la posible obstrucción de zonas aledañas al cauce, particularmente cerca de estructuras de cruce, como los box culvert de altura inferior a 3 metros (particularmente los de vías secundarias), mediante recorridos periódicos y campañas de concientización de la comunidad, con el fin de evitar posibles desbordamientos.

Las profundidades obtenidas de la modelación, entre la calle 13 sur y la quebrada, no son superiores a 0,50 metros, los daños ocasionados por profundidades de inundación de este orden no son elevados y pueden reducirse mediante acciones preventivas con la comunidad, por medio de indicaciones sobre protección de enseres en el primer piso y mejoras locativas puntuales a sus viviendas, o la

construcción de muros de pequeña altura ($h \leq 0.50m$), circundantes a las zonas que puedan ser afectadas. Por otra parte este sector debe incluirse en el SAT que se recomienda para el manejo del riesgo a lo largo de las quebradas El Triangulo y la Pichosa, que se describió anteriormente.

Debido a los altos índices de riesgo económico y social que se observan en la modelación, para los predios al borde del cauce en el costado sur entre la entrega de la quebrada El Triangulo y el puente de la Carrera 8ª este, los cuales están dentro de la zona de ronda, se recomienda el reforzamiento de los muros de estos predios hacia la quebrada. En este sector no hay espacio para construcción de alguna barrera, para hacerlo se debería reubicar esta manzana que tiene del orden de 30 predios.

Tramo entre la carrera 7 este y la carrera 3G este

En este tramo se observa la mayor afectación en población de toda la zona de estudio, como se ve en la Figura 9-31. Se observa que hay una probabilidad alta de niveles de flujo superiores a 1.0m, en el costado sur del Río San Cristóbal. Asociado con estos niveles se pueden esperar daños materiales a las edificaciones que dan a la quebrada, y afectación en algunos predios de hasta 2 personas (zonas verdes del mapa de riesgo social) y en otros entre 4 y 6 personas, esta zona da los mayores niveles de riesgo social por presentar las mayores densidades en la urbanización. Este nivel de riesgo de las personas requiere la intervención de la zona con medidas estructurales, en este caso se recomienda reconstruir el muro de cerramiento de la urbanización que es la zona afectada.

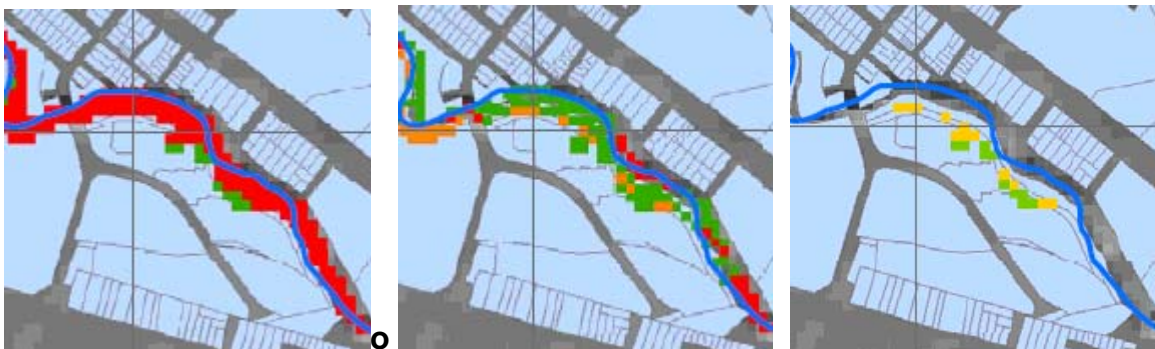


Figura 9-31. Detalle de los mapas de amenaza (izquierda), riesgo económico (centro) y riesgo social (derecha)

Medidas de mitigación

En el sector entre las carreras 7 este y 3G este se requiere la construcción de una estructura de retención de flujos, en este caso se sugiere reemplazar el muro de cerramiento de la urbanización en la margen izquierda de la quebrada.

Tramo entre la carrera 3G este y la carrera 6 este

En el tramo entre la carrera 3 G este y la carrera 6 este, la ronda del río está despejada al costado sur (parque San Cristóbal), mientras que existen algunas viviendas cercanas a la zona de ronda en el costado norte, el nivel de la creciente sería en este caso contenido por los muros de las edificaciones cercanas, como se muestra en las fotografías 9 - 4. y 9 - 5. De presentarse una obstrucción en el box sobre el puente de carrera 6 este, y la caída del muro que separa el conjunto residencial, parte del desbordamiento tomaría las vías cercanas, de ser prolongada esta obstrucción el agua de inundación podría inundar viviendas al costado norte de este tramo, con profundidades bajas.



Fotografía 9 - 4. Zona de ronda entre la carrera 3 G este y la carrera 6 Este.

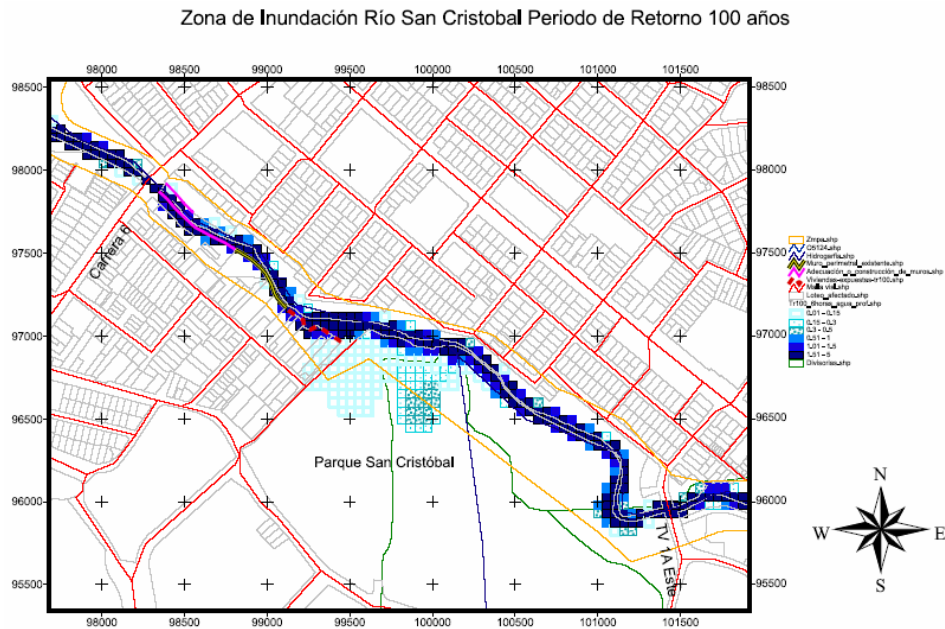


Figura 9-33. Zona afectada por inundación entre TV 1A Este y Carrera 6. Periodo de retorno de 100 años

La Figura 9-34 muestra los mapas de amenaza y riesgo en este sector, de los cuales se observa que existe una alta probabilidad de flujos concentrados en el cauce pero las pérdidas asociadas son bajas. En la zona del parque San Cristóbal se observan grandes áreas de inundación, sin embargo estas están asociadas con la llegada de la quebrada Ramajal, la cual ya está entubada en la parte alta y canalizada en este sector, de manera que estos niveles de inundación en el parque son factibles en caso de obstrucción de la tubería de esta quebrada.

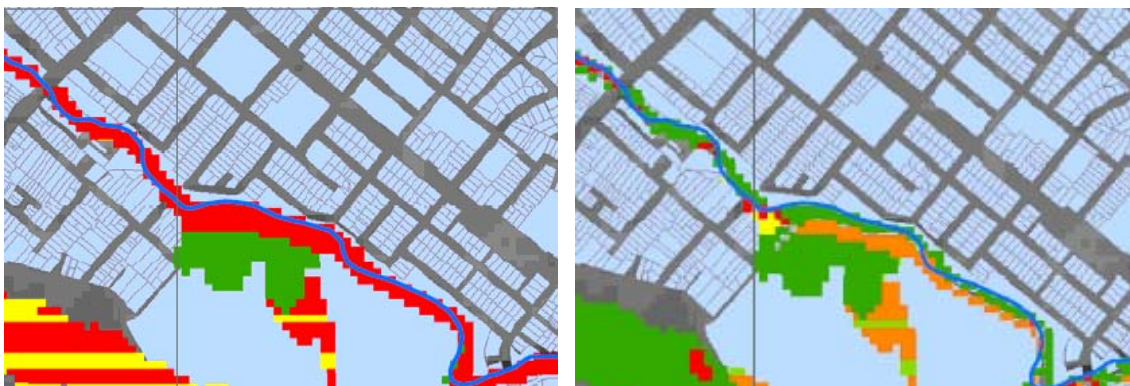


Figura 9-34. Mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha) para el sector entre las carreras 3G este y 6.

Se observa que inmediatamente aguas abajo del parque San Cristóbal entre las carreras 4 y 6 hay posibilidad de pérdidas en unos predios en el costado sur hacia la carrera 4 y unos en la margen norte hacia la carrera 6.

El estado del tramo entre la carrera 4 y la carrera 6 se presenta en las fotografías 9 - 6. y 9 - 7. Al costado sur de este tramo se encuentran viviendas en la zona de ronda, aunque muchas de ellas cuentan con un muro que puede proteger su infraestructura del efecto de elevaciones del nivel de agua durante las crecientes, sin embargo en el tramo final del costado sur, cerca de la carrera 6, y en buena parte del costado norte sería apropiado efectuar una elevación al terraplén a manera de dique, por lo menos de 0,5m para asegurar que la creciente permanezca contenida en el cauce.

El parque de la zona que puede verse afectado por una inundación, aunque existe un muro que protege parte de la zona, existen viviendas con condiciones precarias que podrían verse afectadas de forma significativa, en este caso debido particularmente a que la entrada a estas viviendas se encuentra sobre el costado del cauce, es recomendable construir un muro de protección (altura aproximada de 0,5m) para proteger las viviendas.

En la *Figura 9-35* se observa un detalle del mapa de riesgo asociado con una altura de flujo de 1.0m, en esta se observa que hay un predio en el que puede haber afectación de hasta 2 personas, por lo que se debe implementar alguna medida estructural para reducir el riesgo. Se recomienda la construcción de un muro perimetral que funcione como barrera entre las carreras 4^a y 6^a, en el costado sur de la quebrada.



Figura 9-35. Detalle del mapa de riesgo social en el sector entre las carreras 3G este y 6.



Fotografía 9 - 6. Zona de ronda entre la carrera 4 y la Carrera 6.



Fotografía 9 - 7. Zona de ronda entre la carrera 4 y la Carrera 6.

Medidas de mitigación

Con el fin de controlar los efectos de inundación y flujos en el sector entre las carreras 4a y 6a se recomienda la construcción de muros de baja altura (0.5m). En las Figuras 9-36 y 9-37 se presenta resaltado el tramo de muros perimetrales existentes, y sitios donde se propone construir o mejorar muros de baja altura para proteger algunas viviendas, de la margen sur, de posibles desbordes debidos a crecientes u obstrucciones en el cauce.

En la margen norte antes de llegar a la carrera 6 se recomienda la elevación del terraplén o la construcción de un dique bajo para proteger los predios en ese punto.

Tramo entre la Carrera 6 y la Carrera 10

El tramo entre la carrera 6 y la carrera 10 presenta dos puentes con sus correspondientes box culvert, en el primero en la carrera 8 la sección parece adecuada, sin embargo en el box culvert de la carrera 10 se presenta una reducción considerable en la sección hidráulica, que puede represar el flujo durante una creciente, ocasionando una sobre elevación e los niveles hacia aguas arriba. Sin embargo las modelaciones efectuadas en FLO 2D y en Hec Ras indican que a pesar de producirse un embalse en el tramo de canal entre la carrera 10 y la 8 no se produce desbordamiento.



Fotografía 9 - 8. Río San Cristóbal a la altura de la carrera 10, sección de la estructura de cruce.

Teniendo en cuenta que el box culvert de cruce de la carrera 10 hará parte de la adecuación de la carrera 10 a las obras de Transmilenio, se consultó con la firma que efectuó la Interventoría de los Diseños correspondientes, confirmando que para los caudales de diseño establecidos en el plan Maestro de Alcantarillado la estructura, aunque trabaja en flujo sumergido, no presenta desbordamiento para los caudales de diferentes periodos de retorno, razón por la cual no se han contemplado a la fecha modificaciones a la sección de la sección hidráulica de la estructura en los diseños correspondientes a las obras de Transmilenio. En la 9-36 se presenta la mancha de inundación obtenida para este tramo en FLO 2D para un periodo de retorno de 100 años.

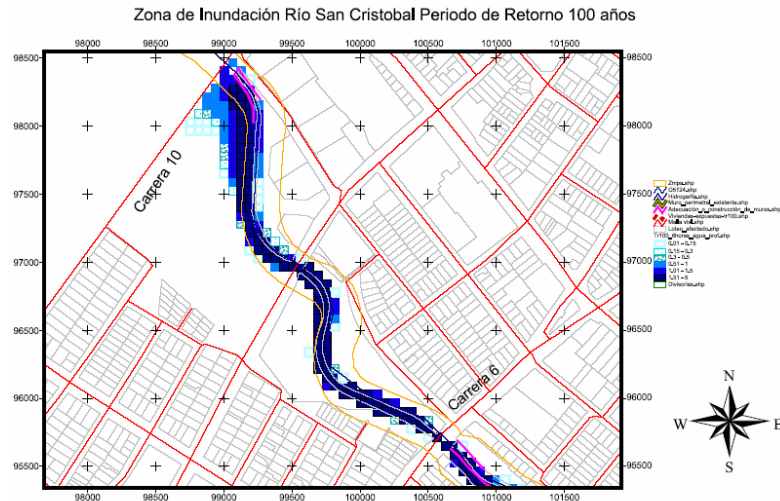


Figura 9-36. Zona de Inundación del Río San Cristóbal entre la carrera 6 y la carrera 10 para un período de retorno de 100 años. Cauce principal.

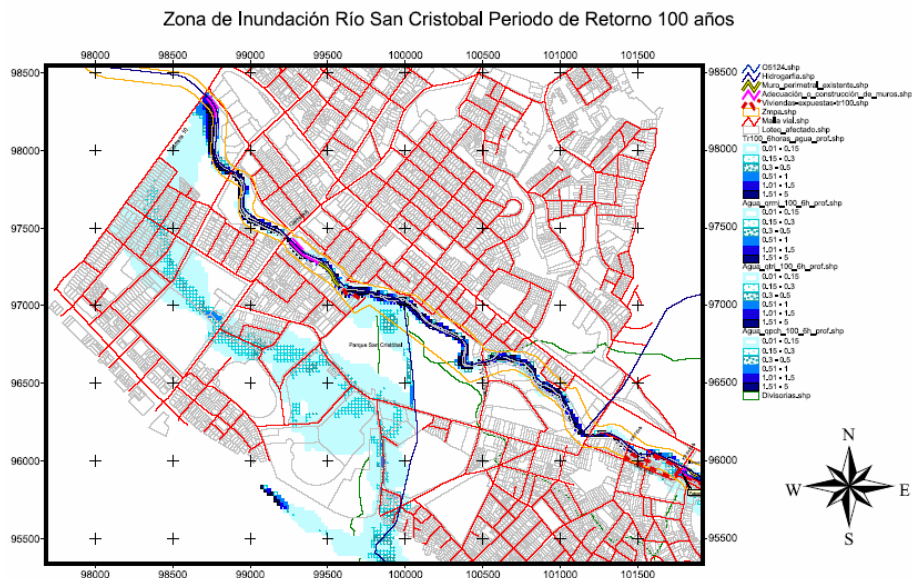


Figura 9-37. Zona de Inundación del Río San Cristóbal entre la carrera 6 y la carrera 10 para un período de retorno de 100 años. Cauce principal y Quebrada Ramajal.

La modelación de este tramo se presenta en las Figuras 9-366 y 9-377, las cuales muestran las zonas de inundación sobre el cauce principal, contenida por la sección del canal y de la zona de manejo en su mayor parte. En la Figura 9-37 se incluye la condición de modelación incorporando la quebrada Ramajal, mostrando que los niveles del flujo se pueden incrementar por la entrega de la quebrada, sin

embargo como se menciona anteriormente esta condición es bajo la hipótesis de obstrucción de la tubería. Los niveles de agua en este sector no superan los 0.3m. Se sugiere para esta condición actividad un continuo monitoreo de la posible acumulación de basuras, ramas u otro elemento que pueda ocasionar la obstrucción del tramo en el que deja de ser canal abierto.

Las inundaciones que pudieran presentarse en las calles no llegarán casi nunca a profundidades mayores de 10cm o 20cm, por lo que junto con el encharcamiento en los patios pueden ser vistos más bien como una incomodidad que como un gran peligro, adicionalmente las condiciones topográficas de la zona de estudio permitirán evacuar las aguas debido a las pendientes de las vías.

En la Figura 9-38 se muestran los mapas de amenaza y riesgo asociados con profundidades de 1.0m. En estos mapas se confirma que los efectos están concentrados en la ronda y que los predios que aparecen con nivel de riesgo social superior a 6 personas afectadas son áreas sin exposición de personas, tal como se observa en el mapa de riesgo social.

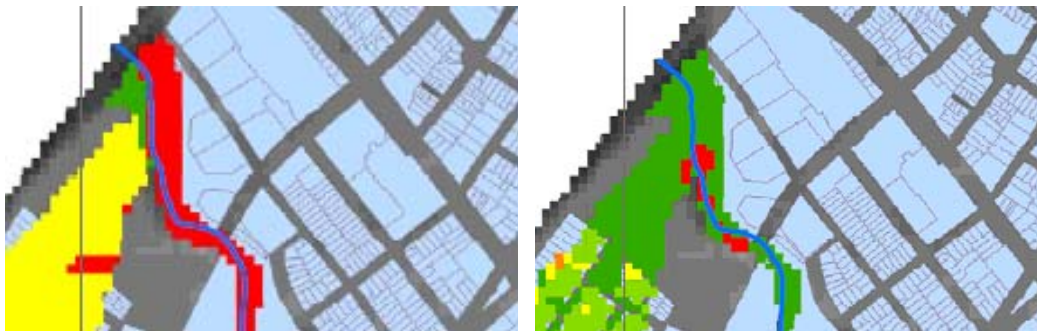


Figura 9-38. Mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha) asociado con una profundidad de 1.0m, en el sector entre las carreras 6 y 10.

Medidas de mitigación

En este sector para evitar que los niveles se eleven y puedan generar inundación en los alrededores se debe prevenir el taponamiento del box culvert de la carrera 10. Se debe en este sentido adelantar campañas de concientización y capacitación asociadas con el SAT que se recomienda para monitorear el sector de las quebradas La Pichosa y El Triangulo.

Quebrada Ramajal

En la Figura 9-39 se presenta el escenario donde se contempla la zona de inundación generada por una creciente de 100 años, considerando un desbordamiento en la quebrada Ramajal, debido a una obstrucción en el tramo de

canal que está revestido. Se presenta que la creciente podría conducirse por las vías hacia las calles aguas abajo, y la zona del parque sólo cumpliría parcialmente su capacidad de amortiguamiento debido a la topografía más alta de las calles adyacentes.

Los mapas de amenaza y riesgo de la parte baja de la quebrada Ramajal se presentan en la Figura 9-40, en ellos se muestra que en el caso de obstrucción del entubamiento se puede generar un área extensa de inundación, la cual puede generar pérdidas en los predios cercanos a la carrera 10. Si bien es cierto también se presentan inundaciones de alguna importancia en el parque San Cristóbal, la ausencia de viviendas en el sector reducen el nivel de riesgo, generándose sólo las pérdidas por el costo de la zona verde.

La Figura 9-41 presenta un detalle del mapa de riesgo social asociado con una profundidad de 1.0m, en la cual se observa que en la parte baja de la quebrada se puede presentar afectación a personas en varios predios. Esto refuerza la necesidad de garantizar que la tubería no se obstruya.

Medidas de mitigación

Es claro de la modelación que el entubado y canalización de la quebrada Ramajal controla los flujos potenciales y sus efectos. Se debe garantizar el funcionamiento del sistema evitando la obstrucción del ducto aguas arriba. Este elemento debe ser incluido en el plan de concientización y capacitación del SAT propuesto para las quebradas La Pichosa y El Triángulo.

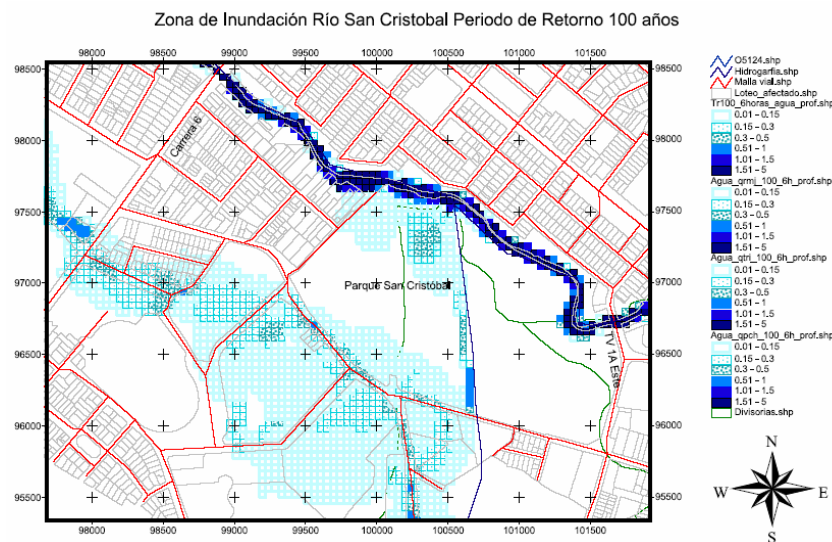


Figura 9-39. Zona afectada por inundación entre Transversal 1A Este y Carrera 6. Periodo de retorno de 100 años

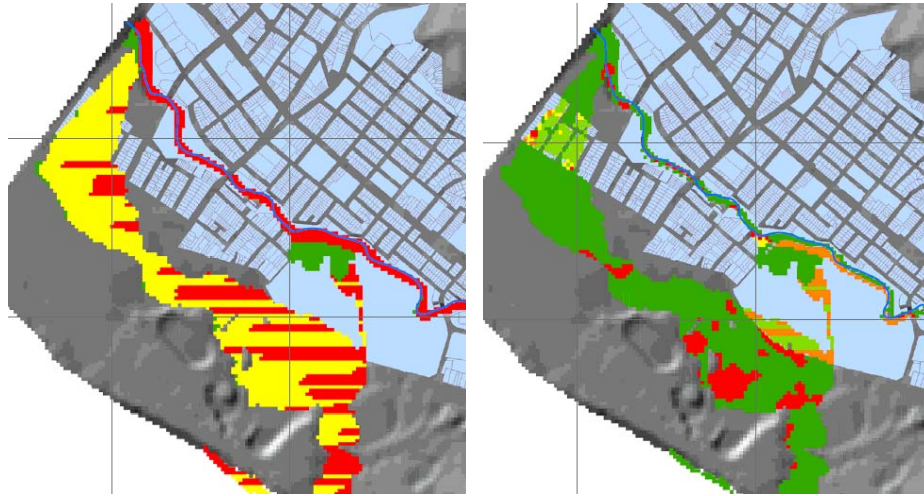


Figura 9-40. Mapas de amenaza (izquierda) y riesgo (derecha) asociado con niveles de flujo superior a 1.0m, en el sector de la parte baja de la quebrada Ramajal.

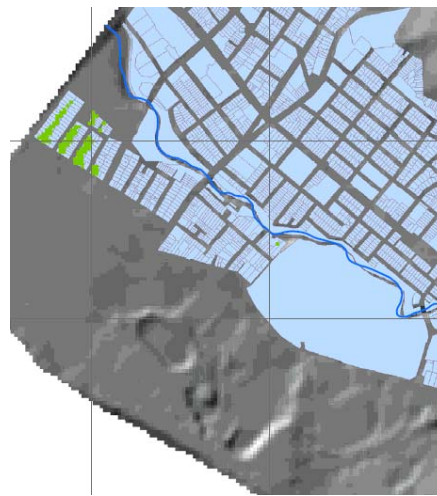


Figura 9-41. Detalle del mapa de riesgo social asociado con una profundidad de flujo de 1.0m, en la zona de la quebrada Ramajal.

Quebradas La Pichosa y El Triángulo

La modelación en las zonas aledañas a las quebradas Aguas Claras o La Pichosa y el Triángulo, mostradas en la Figura 9-30, indica que la cercanía de algunas viviendas a estas quebradas se puede presentar niveles de inundación inferiores a 0,30 metros en la mayoría de los casos. Es claro de esta figura que existe una alta posibilidad de desbordamiento en el sector de Aguas Claras en la parte alta de la

quebrada La Pichosa y en la zona de Montecarlo en la parte baja, en esta última además de los problemas de inundación se tiene un grave problema de inestabilidad.

En la Figura 9-42 se presentan los mapas de amenaza y riesgo de las quebradas El Triangulo y La Pichosa. Para el cauce de la Quebrada El Triangulo se observa que la probabilidad de que el nivel de flujo supere 1.0m de altura es baja en la mayor parte de su longitud, en ella sólo se observa en la parte media un estrechamiento del cauce con el consecuente incremento de altura y su correspondiente concentración de pérdidas, en ese sector no se pudo obtener el registro predial por parte de catastro. Sin embargo las zonas de mayor afectación en la quebrada El Triangulo aparecen como zonas no urbanizadas, de manera que el riesgo social es reducido. Igual ocurre en la parte baja de esta quebrada antes de su entrega a la Río San Cristóbal, en donde se incrementa el nivel del flujo, pero en este caso las pérdidas están en niveles bajos y medios debido a la afectación sobre zonas no urbanizadas, allí se observa la posible afectación a personas en un predio. El mayor efecto está asociado con el incremento de la altura de flujo en la Río San Cristóbal como ya se explicó anteriormente.

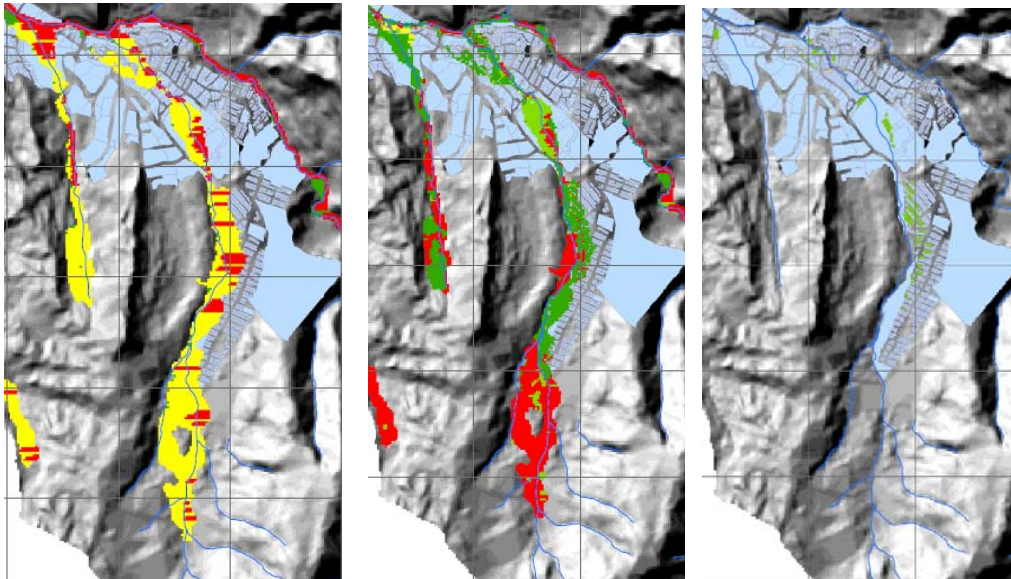


Figura 9-42. Mapas de amenaza (izquierda), riesgo económico (centro) y riesgo social (derecha) para una profundidad de 1.0m a lo largo de las quebradas El Triangulo y La Pichosa.

Para la quebrada La Pichosa, se presenta una zona de riesgo económico con pérdidas superiores a los \$75.000 en la parte alta asociado con el costo de predios no urbanizados y zonas verdes, por lo que no hay afectación a las personas en ese sector. Sin embargo en la parte media, en el barrio Aguas Claras, se observa

un buen número de predios con posible afectación a personas, así como en la parte baja en los barrios Montecarlo y San Cristóbal alto.

Medidas de mitigación

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá contrató un estudio de detalle con la empresa Gómez, Cajiado y Asociados, para determinar la zona de ronda, la zona de protección ambiental y diseñar las obras para el saneamiento y control de flujos a lo largo de la quebrada La Pichosa. En este estudio de manera general se recomienda, entre otras, hacer conservación de las quebradas en la forma más natural posible, evitando la intervención en los cauces a menos de que sea necesario, que se haga el saneamiento de las quebradas a través de interceptores y colectores que recojan los vertimientos de aguas negras, minimizar el impacto social por reasentamientos, y estabilización geotécnica de las zonas inestables en las márgenes de las quebradas.

En este sentido se debe resaltar que la parte baja de la Quebrada La Pichosa atraviesa la zona de los barrios Aguas Claras, La Gran Colombia y Montecarlo, que han sido identificados en el estudio de Gómez, Cajiado y Asociados y en el presente proyecto como zonas geotécnicamente inestables, como se presentó en el Capítulo 7.

En el aspecto de control de crecientes, para la quebrada La Pichosa se concluye en el estudio de Gómez Cajiado que el cauce en su totalidad es capaz de conducir la creciente de los 100 años implementando las obras de estabilización, erosión y de paso en cada una de las vías que cruzan esta quebrada. Sin embargo, tal y como se encontró en el presente estudio existen predios dentro de la zona de ronda y otros en zonas inestables, en particular en el Barrio Montecarlo, por lo que el estudio además de las obras recomienda la compra de predios aledaños a la quebrada dentro de la zona de ronda.

Las obras contempladas por Gómez Cajiado para mejorar las condiciones actuales del cauce, y que se describieron en el Capítulo 8, buscan en esencia el saneamiento de la quebrada mediante la construcción de redes de alcantarillado y adquisición de los predios que entregan aguas negras directamente a la quebrada, por el lado de la adecuación hidráulica la estrategia planteada es aumentar la capacidad hidráulica de los cruces mediante la construcción de estructuras de paso como box culverts, tuberías y estructuras de caída, en aquellos cruces que no tienen la capacidad o que las estructuras actuales están deterioradas, por otra parte, se recomienda que los predios aledaños a la quebrada dentro de la zona de ronda sean comprados, así como aquellos que están en zona de riesgo geotécnico, en particular el barrio Montecarlo. Adicionalmente se recomiendan algunas estructuras en gaviones para estabilizar algunos sectores y proteger contra erosión las estructuras de paso.

Una alternativa a la solución propuesta por Gómez Cajiao es la canalización de la quebrada. El presente estudio hizo la modelación en FLO 2D de la condición canalizada de las quebradas El Triangulo y La Pichosa (Figura 9-30), mostrando que concentrando el flujo el efecto directo sobre los predios se reduce significativamente, particularmente en la parte baja. Esta solución muestra que de todas formas en la parte alta en el sector de Aguas Claras se pueden generar zonas de inundación pero que las alturas de flujo son muy bajas y el riesgo sería muy bajo.

Un inconveniente de la canalización, adicional a su fuerte impacto ambiental, es que en la parte baja, en el sector de Montecarlo, se presenta un proceso de inestabilidad activo, que según los análisis de estabilidad regional del presente estudio se puede generalizar a toda la ladera que incluye los barrios Montecarlo, La Gran Colombia, Santa Cecilia y Aguas Claras, afectando las estructuras rígidas que se construyan, de manera que sin obras de estabilización de la zona la durabilidad de la canalización sería muy corta.

Con base en las observaciones anteriores se recomienda, para las quebradas El Triángulo y La Pichosa, dividir las medidas de mitigación en dos etapas: la primera consistente en el SAT presentado en la primera parte de este capítulo y una segunda que se inicie lo más pronto posible, en la que se implementen las medidas sugeridas por Gómez Cajiao. Con relación a estas últimas se recomienda iniciar con la construcción de las obras de adecuación hidráulica y posteriormente hacer todo el trabajo de reubicación sugerido.

Quebrada Vitelma

La modelación de los flujos a lo largo de la quebrada Vitelma muestra que esta es una zona muy susceptible a ser inundada. En la actualidad el cauce en su parte inferior está entubado y se considera que los escenarios analizados son potenciales en caso que se llegue a presentar una obstrucción de dicha tubería.

La Figura 9-43 muestra los mapas de amenaza y riesgo, para esta quebrada, relacionados con una profundidad de 1.0m. Se observa que la probabilidad de que el nivel del flujo alcance una profundidad mayor a 1.0m es alta sólo en la parte alta y concentrado en el cauce. En la mayor parte del área de inundación se observa que la probabilidad de que se presente un nivel alto es media, lo que condiciona la presencia de niveles medios a altos de pérdidas económicas.

En términos de afectación a personas se observa como en la parte baja de esta cuenca se pueden llegar a afectar un importante número de personas, aunque en cada predio la afectación es baja. En la parte alta también se alcanza a presentar una zona, ésta cercana al cauce, donde se observa alguna posibilidad de afectación a personas.

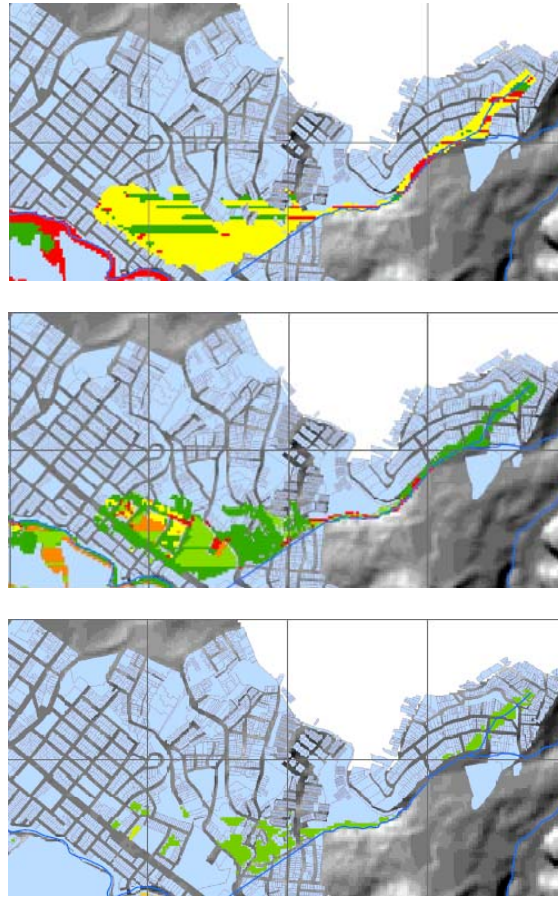


Figura 9-43. Mapas de amenaza (superior), riesgo económico (medio) y riesgo social (inferior) para una profundidad de 1.0m a lo largo de la quebrada Vitelma.

Medidas de mitigación

En el estudio de Fabio Pico & cia., se propone para esta quebrada el manejo de las aguas servidas y aguas lluvias, más para control geotécnico que hidráulico. De la modelación para el presente estudio se observa que la parte alta requiere una estructura que concentre los flujos a lo largo del cauce. Debido a la lata intervención de esta cuenca se puede ver que cualquier desborde estaría afectando las viviendas y sus habitantes. En este sector, debido a que la probabilidad de que se presenten niveles altos es baja y que para una profundidad de 1.0m la afectación esperada es baja, se recomienda extender el SAT a este sector, en particular lo relacionado con la alerta a los habitantes cuando se alcancen los niveles críticos propuestos anteriormente.

En la parte media se observa que los flujos se concentran en el cauce y no hay afectaciones importantes, por lo que no se requiere ninguna obra en particular. Por su parte en la parte baja si se llega a presentar un taponamiento de la tubería, se

pueden generalizar las pérdidas, por lo que es fundamental el mantenimiento de esta tubería y establecer planes de limpieza y capacitación en la población de este sector.

9.3 Consideraciones generales sobre las obras a implementar

A lo largo de las zonas de inundación de las diferentes quebradas y sectores del Río San Cristóbal, se identificaron algunas actividades a implementar las cuales se resumen en reubicación de población que habita en algunos predios en latos riesgo y que están dentro de la zona de ronda, construcción de estructuras para aumentar la capacidad hidráulica del cauce como diques o muros bajos, la construcción de estructuras hidráulicas de paso (quebrada La Pichosa) y la implementación de un SAT para prevenir efectos en la población en algunos sectores como las quebradas La Pichosa, El Triángulo y Vitelma, la parte baja del Río San Cristóbal y las áreas aledañas a los cruces sobre la Río San Cristóbal.

A continuación se presentan de manera general las características y recomendaciones a tener en cuenta con relación a las estrategias estructurales. Las observaciones relacionadas con el SAT se incluyeron en la primera parte de este capítulo.

En la cuenca alta (arriba de la carrera 6 Este) se descartan estructuras de disipación debido a que el cauce no muestra evidencia de cargas altas de sedimentos, y estas estructuras generarían niveles mayores en el cauce, lo que resultaría contraproducente dada la cercanía de las viviendas a la zona de ronda, esto podría generar desbordamientos en puntos inadvertidos.

Las medidas estructurales mas apropiadas, como se identificó anteriormente, son la construcción de barreras localizadas. Las barreras mantienen las aguas de inundación superficial a distancia antes de llegar hasta las edificaciones. Normalmente se consideran tres tipos de barreras: grandes diques de contención en tierra, barreras de tierra más pequeñas y barreras de concreto reforzado o acero contra-inundaciones. Estas barreras pueden rodear las construcciones por completo o estar conectadas a niveles del suelo adyacentes mas elevados. Para la zona en estudio se recomienda la construcción de algunos muros y diques bajos.

La mayoría de las barreras de tierra son hechas con materiales de relleno de la misma área (Manual de Protección contra inundaciones, Condado de Boulder, 2002). Su resistencia se origina por la masa que estos poseen por lo que necesitan mucho espacio para su construcción. El diseño estándar, por ejemplo en los Estados Unidos es de tres pies (un metro) de relleno horizontal por uno (30 cm) de relleno vertical (pendiente 3:1). Teniendo en cuenta lo anterior, se debería tener disponible alrededor de seis pies (1.82 m) de superficie de suelo por cada

pie (30 cm) en elevación. Las bermas deben ser propiamente compactadas y ancladas para prevenir deslizamientos. En las zonas donde no hay suficiente espacio son usadas estructuras pequeñas en concreto reforzado o muros de mampostería confinados. Las paredes contra-inundaciones deben de ser herméticas y perfectamente ancladas para poder soportar la presión hidrostática lateral.

Una construcción no debe de ser “impermeabilizada en seco” (es decir, cuando todas las áreas debajo del nivel de protección de la inundación son construidas herméticamente), si las aguas de inundación llegaran a tener más de 1 metro de profundidad o a moverse con velocidades mayores de 1.50 m/s. Este tipo de protección de acuerdo con la modelación de FLO 2D, puede requerirse en el caso de la calle 13 sur entre Carrera 8 A este y Carrera 6 Este, sin embargo debe tenerse en cuenta que tratar de mantener las aguas afuera de la propiedad cuando estas han alcanzado más de un metro de profundidad, puede resultar en colapso de muros, desnivel de pisos y peligro para los ocupantes del edificio. La mayoría de los muros y pesos no son construidos para soportar la presión hidrostática. Como resultado, muros y pisos impermeabilizados bajo estas condiciones se pueden fracturar o ceder por la presión del agua.

Una forma de enfrentar esta situación es sugerir a los habitantes remover todo lo que pueda ser dañado por la inundación y simplemente dejar entrar el agua. Esto es lo que se denomina a prueba de inundación -en húmedo-. Se pueden implementar muchas consideraciones para minimizar el daño potencial a la construcción y los elementos que contiene si la inundación llega a entrar. Estas técnicas varían desde mover los artículos de valor a partes de mayor elevación dentro de la casa hasta reconstruir el área susceptible de ser inundada, sin embargo esta estrategia requiere un alto grado de sensibilización de la comunidad, y se dificulta por la existencia de establecimientos comerciales (almacenes de víveres, cafeterías, etc). En este sentido se plantea apoyar las alertas a la población con el SAT de manera que tengan el tiempo suficiente para proteger sus bienes y evacuar sus predios, las estrategias y capacitación de la población en estas acciones deben ser parte del SAT como se explicó anteriormente.

Se presentan casos particulares de obras de protección puntuales y longitudinales de zonas en riesgo de inundación, mediante muros en mampostería perimetrales y paralelos a la zona de inundación, cierres con muros en concreto para evitar inundación de vías y muros perimetrales en concreto, este tipo de soluciones puede implementarse a bajo costo en las zonas cercanas a la ronda del río San Cristóbal entre la carrera 4 y carrera 10.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se proponen como obras para mitigación del riesgo por inundación, la elevación o ampliación de los diques o taludes naturales del cauce cuando la distancia hasta la edificación o vía más

cercana sea mínimo de 3 metros, en caso contrario se propone la construcción de muros en mampostería o concreto reforzado, dependiendo si la altura requerida es inferior o superior a 0,5m.

En los sitios que cuentan con puentes cuyos box tengan dimensiones pequeñas, se recomienda adecuar o mejorar los muros de protección aumentando su altura, estos casos son el puente sobre el río San Cristóbal en la carrera 8A Este, y el puente de la carrera 10, cuyo muro de protección se encuentra deteriorado, al costado sur de este último caso se encuentra la zona verde de un Colegio, por lo que debe mejorarse la elevación del talud de protección.

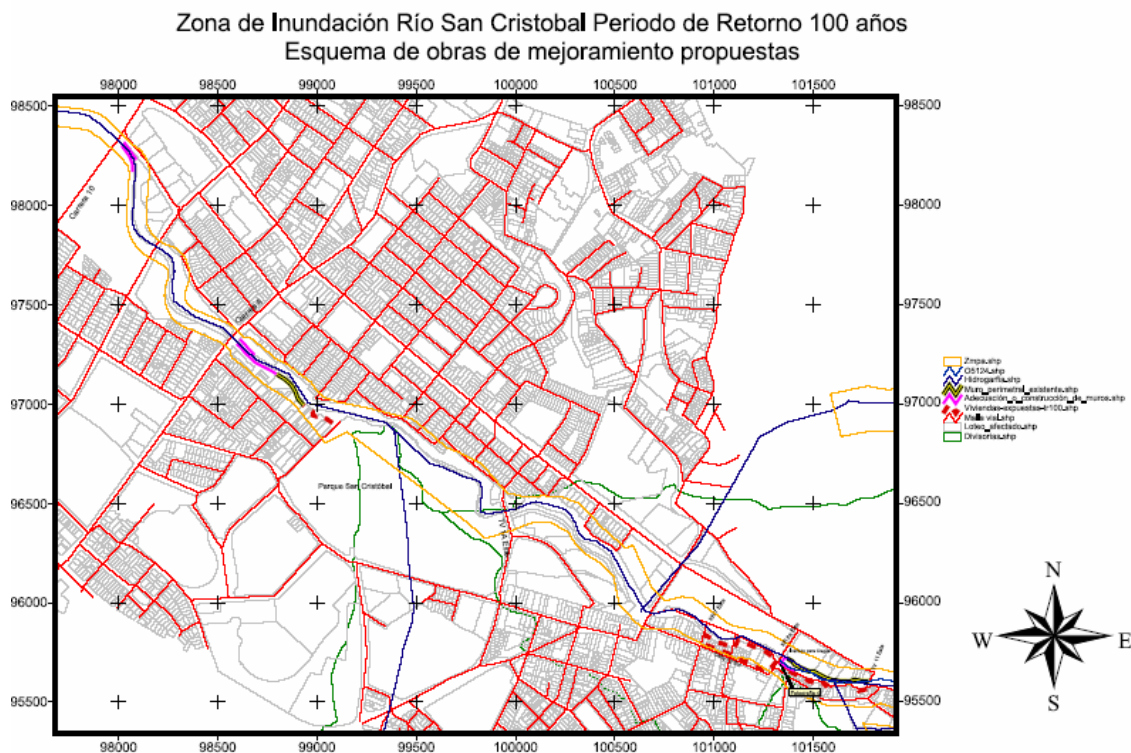


Figura 9-43. Obras propuestas para reducción del riesgo por inundación.

En la Figura 9-43. se presenta el esquema general de las obras propuestas como medidas estructurales para la reducción del riesgo por inundación en la zona de ronda del Río San Cristóbal, entre ellas se encuentran:

La revisión y adecuación de muros perimetrales existentes, estos muros se encuentran construidos en mampostería y a primera vista no cuentan con columnas ni otro elemento que les de estabilidad ante una sobre elevación del

nivel que ocasione una presión hidrostática externa, estos muros aíslan zonas de parqueaderos, patios y jardines de zonas residenciales o institucionales (por ejemplo el Instituto de Ciegos), aunque muchos de ellos se encuentran en niveles altos, de provocarse un represamiento de los niveles en zonas cercanas o un sismo pueden ocasionar su caída. Por otra parte estos muros pueden ser permeables y se puede generar afectación a las viviendas o edificaciones internas en caso de una filtración.

Adecuación de diques o terraplenes: estas zonas fueron descartadas en la modelación en FLO 2D como con recorrido en campo para el caso de la cuenca del río, y se restringen a zonas con alturas bajas en algunos sectores, de presentarse represamiento del cauce conducirían las aguas de creciente a inundar zonas residenciales, por lo que se sugiere en este caso conformar o elevar diques con material de la zona y con cubierta vegetal de manera que se pueda elevar la zona demarcada alrededor de 0,50 metros, esta mejora se debe hacer hacia el extremo externo de la zona de ronda para incrementar la capacidad de almacenamiento del tramo.

Adecuación o construcción de muros: Las zonas demarcadas requieren la construcción o aumento del nivel de los muros en concreto existentes, con el fin de contener posibles represamientos o desbordamientos en puntos críticos que tengan afectación directa en predios ubicados en zonas de riesgo, como es el caso del tramo aguas arriba de la carrera 6 y el muro sobre el puente de la carrera 8 A este.

Como una medida adicional de carácter preventivo puede ser la de profundizar la zona aledaña al cauce en el parque san Cristóbal y la zona verde entre las carreras 8A este y 6 este hacia la calle 11 sur para ser empleados como zonas de amortiguamiento, ya que su elevación actual brinda poca capacidad.

En el Plano Medidas de Mitigación Estructural se presenta el compendio de las obras propuestas en este Capítulo.