



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

**ESTUDIO DE AMPLIFICACIÓN SÍSMICA EN LOS SITIOS
ESTABLECIDOS POR EL DPAE A TRAVÉS DE ANÁLISIS
UNIDIMENSIONAL, TRANSPORTANDO EN UN ANÁLISIS NO
LINEAL POR ETAPAS LA SEÑAL DESDE LA ROCA A LA
SUPERFICIE.**

CONVENIO DE COOPERACIÓN 487-2006

INFORME FINAL

Agosto de 2007



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

Tabla de Contenido

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. GRUPO DE TRABAJO	1
3. DOCUMENTACIÓN REQUERIDA	1
3.1. INFORMACIÓN RECIBIDA	1
3.1.1 <i>Modelo Geotécnico</i>	1
3.1.2 <i>Sismos Seleccionados Decreto 193</i>	2
3.1.3 <i>Información Sísmica Bogotá</i>	2
4. METODOLOGÍA	2
5. RECOLECCION Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION QUE SIRVE DE INSUMO PARA LA EVALUACION DE LA RESPUESTA	5
5.1. PERFILES GEOTÉCNICOS	5
5.2. ESPESOR Y ORDEN DE APARICIÓN DE LOS ESTRATOS DE SUELO	10
5.3. PROPIEDADES ÍNDICE DE CADA HORIZONTE	11
5.4. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	12
5.5. CORRELACIONES POR ZONA	16
5.5.1 <i>Zona 1</i>	16
5.5.2 <i>Zona 2</i>	17
5.5.3 <i>Zonas 3 y 4 y transición 3-4</i>	18
5.5.4 <i>Zona 5</i>	21
5.6. CURVAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN POR CORTANTE	22
5.6.1 <i>Curvas de materiales en la zona 1</i>	23
5.6.2 <i>Curvas de materiales en la zona 2</i>	24
5.6.3 <i>Curvas de materiales en las zonas 3 y 4</i>	26
5.6.4 <i>Curvas de materiales en la zona 5</i>	31
5.7. REGISTROS SÍSMICOS	31
6. MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SUELO	36
7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	36
7.1. ZONA 1	37
7.1.1 <i>Respuesta a los eventos de sismofuentes locales</i>	37
7.1.2 <i>Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias</i>	38
7.1.3 <i>Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas</i>	40
7.1.4 <i>Respuesta total</i>	41



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

7.2.	ZONA 2.....	43
7.2.1	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.....</i>	<i>44</i>
7.2.2	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.</i>	<i>44</i>
7.2.3	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.</i>	<i>45</i>
7.2.4	<i>Respuesta total.</i>	<i>45</i>
7.3.	ZONA 3.....	47
7.3.1	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.....</i>	<i>47</i>
7.3.2	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.</i>	<i>48</i>
7.3.3	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.</i>	<i>48</i>
7.3.4	<i>Respuesta total.</i>	<i>49</i>
7.4.	ZONA 4.....	50
7.4.1	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.....</i>	<i>50</i>
7.4.2	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.</i>	<i>51</i>
7.4.3	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.</i>	<i>51</i>
7.4.4	<i>Respuesta total.</i>	<i>52</i>
7.5.	ZONA 5.....	53
7.5.1	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.....</i>	<i>53</i>
7.5.2	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.</i>	<i>54</i>
7.5.3	<i>Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.</i>	<i>54</i>
7.5.4	<i>Respuesta total.</i>	<i>55</i>
8.	ESPECTROS DE DISEÑO	56
8.1.	COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS Y LOS ESPECTROS DE DISEÑO.	59
9.	CONCLUSIONES	64
10.	REFERENCIAS.....	66
ANEXO A.....		67
10.1.	TABULACIÓN DE ESPECTROS PROPUESTOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

Lista de Figuras

	Página
FIGURA 1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS UNIDIMENSIONAL DE LOS SITIOS PROPUESTOS.	4
FIGURA 2. VERIFICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS, TENIENDO EN CUENTA LA HUMEDAD Y Gs.	12
FIGURA 3 A. REPRESENTACIÓN DE LA BONDAD DE LAS CORRELACIONES PARA HALLAR V _S DE ACUERDO CON DOS TIPOS DE MODELOS DE REGRESIÓN. ZONA 1.	14
FIGURA 4 B. REPRESENTACIÓN DE LA BONDAD DE LAS CORRELACIONES PARA HALLAR V _S DE ACUERDO CON DOS TIPOS DE MODELOS DE REGRESIÓN. ZONA 2.	14
FIGURA 5. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS PARA EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN LA ZONA 1.	23
FIGURA 6. FAMILIAS DE CURVAS UTILIZADAS EN EL GRUPO 1 DE LA ZONA 1, CORRESPONDIENTES A ARENAS.	24
FIGURA 7. FAMILIAS DE CURVAS UTILIZADAS EN EL GRUPO 2 DE LA ZONA 1, CORRESPONDIENTES A SUELOS RESIDUALES DE ROCAS SEDIMENTARIAS.	24
FIGURA 8. HISTOGRAMAS DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD; IZQUIERDA TRANSICIÓN 1-2; DERECHA ZONA 2.	25
FIGURA 9. HISTOGRAMAS DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LA FORMACIÓN CHÍA EN LA ZONA 4.	25
FIGURA 10. HISTOGRAMAS DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LA FORMACIÓN SABANA EN LA ZONA 5.	26
FIGURA 11. IZQUIERDA; EFECTO DE LA PLASTICIDAD (DOBRY Y VUCETIC, 1991), DERECHA; EFECTO DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE ACUERDO CON LA PLASTICIDAD (ISHIBASHI ZHANG, 1993).	27
FIGURA 12. FAMILIAS DE CURVAS UTILIZADAS EN LA FORMACIÓN CHÍA.	28
FIGURA 13. FAMILIAS DE CURVAS UTILIZADAS EN LA FORMACIÓN SABANA.	28
FIGURA 14. CURVAS PLANTEADAS PARA LA FORMACIÓN SUBACHOQUE.	28
FIGURA 15. VARIACIÓN DE LA PLASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD PARA LA FORMACIÓN SUBACHOQUE.	29
FIGURA 16. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA PARA EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN LA FORMACIÓN SUBACHOQUE DE ACUERDO CON LA ZONA.	30
FIGURA 17. EFECTO DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN LA CURVA DE DEGRADACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ PARA LA FORMACIÓN SUBACHOQUE EN LA ZONA 3. MODELO DE ISHIBASHI ZHANG (1993) SIN MODIFICAR.	30
FIGURA 18. EVENTOS SÍSMICOS EMPLEADOS EN LOS ANÁLISIS DINÁMICOS. EL EVENTO XALTINGUIS SE PRESENTA PERO FUE EXCLUIDO DE LOS ANÁLISIS.	32



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

FIGURA 19. CONTENIDO DE FRECUENCIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS POR SISMOFUENTE	34
FIGURA 20. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES (5% AMORTIGUAMIENTO) DE EVENTOS SÍSMICOS POR SISMOFUENTE SIN ESCALAR.....	35
FIGURA 21. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LOCALES EN LA ZONA 1.....	38
FIGURA 22. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES INTERMEDIAS EN LA ZONA 1.	39
FIGURA 23. ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELERACIONES (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LEJANAS EN LA ZONA 1.	40
FIGURA 24. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIONES (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA TODAS LAS SISMOFUENTES EN LA ZONA 1, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE DISEÑO VIGENTE.	41
FIGURA 25. COEFICIENTE DE VARIACIÓN POR SISMOFUENTE PARA SITIO DE LA ZONA 1.	43
FIGURA 26. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LOCALES EN LA ZONA 2.....	44
FIGURA 27. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES INTERMEDIAS EN LA ZONA 2.	44
FIGURA 28. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LEJANAS EN LA ZONA 2.	45
FIGURA 29. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA TODAS LAS SISMOFUENTES EN LA ZONA 2, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE DISEÑO VIGENTE.	46
FIGURA 30. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LOCALES EN LA ZONA 3.....	47
FIGURA 31. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES INTERMEDIAS EN LA ZONA 3.	48
FIGURA 32. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LEJANAS EN LA ZONA 3.	48
FIGURA 33. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA TODAS LAS SISMOFUENTES EN LA ZONA 3, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE DISEÑO VIGENTE.	49
FIGURA 34. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LOCALES EN LA ZONA 4.	50
FIGURA 35. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES INTERMEDIAS EN LA ZONA 4.....	51
FIGURA 36. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LEJANAS EN LA ZONA 4.....	51
FIGURA 37. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA TODAS LAS SISMOFUENTES EN LA ZONA 4, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE DISEÑO VIGENTE.	52



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

FIGURA 38. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LOCALES EN LA ZONA 5.	53
FIGURA 39. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES INTERMEDIAS EN LA ZONA 5.	54
FIGURA 40. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA SISMOFUENTES LEJANAS EN LA ZONA 5.	54
FIGURA 41. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA TODAS LAS SISMOFUENTES EN LA ZONA 5, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE DISEÑO VIGENTE.	55
FIGURA 42. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PROPUESTOS PARA TODAS LAS ZONAS.	59
FIGURA 43. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA ZONA 1 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	60
FIGURA 44. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA ZONA 2 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	60
FIGURA 45. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA ZONA 3 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	61
FIGURA 46. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA ZONA 4 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	61
FIGURA 47. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA ZONA 5 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	62
FIGURA 48. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA TRANSICIÓN 1-2 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	62
FIGURA 49. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA TRANSICIÓN 2-3 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	63
FIGURA 50. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA TRANSICIÓN 2-5 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	63
FIGURA 51. ESPECTROS DE DISEÑO DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PARA LA TRANSICIÓN 3-4 CONSIDERANDO LA MEDIA MÁS DESVIACIÓN ESTANDARD EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	64
FIGURA 52. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PROPUESTO CON 1 MESETA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 53. ESPECTROS DE RESPUESTA DE ACELERACIÓN (5% AMORTIGUAMIENTO) PROPUESTO CON 2 MESETAS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

Lista de Tablas

	Página
TABLA 1. PERFILES POR ZONA, SUMINISTRADOS PARA EL ANÁLISIS.	5
TABLA 2. PROFUNDIDADES HASTA LAS CUALES SE TIENEN DATOS EN LAS ZONAS.	6
TABLA 3. VALORES TÍPICOS DE G_s	11
TABLA 4. RESUMEN ESTADÍSTICO DEL MEJOR AJUSTE PARA V_s EN FUNCIÓN DE Z^2 , ZONA DE TRANSICIÓN 3-4.	17
TABLA 5. RESUMEN ESTADÍSTICO DEL MEJOR AJUSTE PARA V_s EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL, LA PROFUNDIDAD E ÍNDICE DE PLASTICIDAD PARA LA ZONA 2... ..	18
TABLA 6. RESUMEN ESTADÍSTICO DEL MEJOR AJUSTE PARA V_s EN FUNCIÓN DE σ'_c , ZONA DE TRANSICIÓN 3-4.	20
TABLA 7. RESUMEN ESTADÍSTICO DEL MEJOR AJUSTE PARA V_s EN FUNCIÓN DE Z , ZONA DE TRANSICIÓN 3-4.	21
TABLA 8. RESUMEN ESTADÍSTICO DEL MEJOR AJUSTE PARA V_s EN FUNCIÓN DE $f(\sigma'_c, e)$, ZONA 5.....	21
TABLA 9. AGRUPACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE ACUERDO CON LA FRECUENCIA DE APARICIÓN DE TIPOS DE SUELOS.....	22
TABLA 10. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS EVENTOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO.	33
TABLA 11. PARÁMETROS PARA DETERMINACIÓN DE LOS ESPECTROS EN CADA ZONA Y SUS TRANSICIONES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.



ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA

1. INTRODUCCIÓN

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, ha suscrito un convenio con la FOPAE para realizar estudios de Amplificación Sísmica, en los sitios que ha establecido la DPAE a través de un análisis unidimensional, transportando en un análisis no lineal por etapas la señal desde la roca hasta la superficie". Para realizar este objeto, se ha realizado, por medio del programa SHAKE (Schnabel, et. al, 1972), el análisis de la amplificación unidimensional de señales sísmicas a lo largo de perfiles de suelos integrados por materiales con comportamiento no lineal, para un conjunto de aproximadamente doscientos (200) sitios de la ciudad de Bogotá, empleando en cada uno de ellos quince (15) acelerogramas, lo que da un total aproximado de tres mil (3 000) corridas con dicho programa.

A continuación se presenta el Informe que contiene la información recibida, la metodología utilizada y los resultados obtenidos.

2. GRUPO DE TRABAJO

El trabajo se realizó con la participación de ingenieros de AIS, alrededor de los cuales se integró un grupo de trabajo para la realización del Contrato. La Dirección estuvo a cargo del Ingeniero Josef Farbiarz F., con la coordinación del Modelo de Suelos a cargo del Ingeniero Manuel R. Villarraga y el aporte de un número importante y selecto de ingenieros especialistas en el tema de amplificación dinámica de suelos.

3. DOCUMENTACIÓN REQUERIDA

3.1. Información recibida

De acuerdo con el compromiso contractual, la DPAE ha suministrado la documentación e información necesaria para realizar los análisis objeto del contrato. Se recibió un disco con información digital, que contenía dos carpetas:

3.1.1 Modelo Geotécnico

Esta carpeta contiene, a su vez, dos carpetas: "*Base de datos*" y "*Modelo Base*".

La primera incluye la información recopilada de las perforaciones, divididas en perforaciones recopiladas de los estudios anteriores en las diferentes zonas y transiciones, cuya información se recibió en formato *.xls (excel); y las perforaciones realizadas ex profeso para la Microzonificación, que se recibieron en formato *.pdf. Los archivos en este último formato no pudieron abrirse



ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA

inicialmente y se recibieron más tarde, directamente de los profesionales que están trabajando con la Sociedad Colombiana de Geotecnia, para el DPAE.

La carpeta “*Modelo Base*” contiene diversos archivos en formatos de Autocad y ArcGIS, con los que se produjeron los mapas para la Microzonificación.

3.1.2 Sismos Seleccionados Decreto 193

Esta carpeta contiene los registros de los sismos seleccionados por el DPAE como representativos de las sismofuentes que amenazan a la ciudad de Bogotá, clasificados en grupos de acuerdo con la distancia epicentral y el tipo de fuente como: lejanos, regionales y locales, en función de su aceleración máxima, los cuales fueron escaldos en amplitud para analizar los efectos locales mediante propagación unidimensional, a valores de 0.038 g, 0.20 g y 0.25 g, respectivamente.

3.1.3 Información Sísmica Bogotá

Se contó igualmente con la siguiente información:

- Información de la secuencia estratigráfica de la sabana incluyendo la información de la velocidad de propagación de ondas de corte hasta roca.
- Informe procesamiento e interpretación de sismos de Bogotá, preparado por la Universidad de los Andes.
- Información de la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB), la cual contiene información de los sismos registrados entre los años de 1999 a 2001 en diferentes estaciones acelerográficas de Bogotá.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el análisis de la respuesta de sitio contempló elementos que inciden sobre la variabilidad de la respuesta, la cual fue estimada considerando por una parte la variación de las propiedades dinámicas de los materiales, en lo referente a la variabilidad de su velocidad y el comportamiento no lineal de acuerdo con el nivel de deformación inducido durante la propagación de ondas; y por otra parte, las características del movimiento sísmico, contemplando un grupo de registros de sismos representativos de las fuentes cercana, intermedia y lejana de la amenaza sísmica para Bogotá, seleccionados por la DPAE a partir de los registros de movimiento suministrados por el INGEOMINAS.

Este análisis se efectuó para cada uno de los perfiles geotécnicos suministrados en el modelo geotécnico de la Sabana, el cual contiene información acerca de las propiedades índice tales como: humedad natural, límites de consistencia y pesos unitarios; así como propiedades dinámicas en términos de la velocidad de propagación de ondas de corte.



ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA

El espesor total de los depósitos de suelo fue obtenido a partir de la localización geográfica de cada perfil utilizando el mapa de profundidades de roca (969ProfRoca.dwg), suministrado en el Modelo Base.

Para la evaluación de la respuesta de cada sitio se utilizó un modelo no lineal basado en el método lineal equivalente propuesto por Seed y ejecutado a través del programa para computador SHAKE, desarrollado por Seed y Schnabel (1971) y que sigue siendo empleado en todo el mundo para el análisis de la respuesta no lineal. Este programa ha sido validado con base en numerosas comparaciones con otros métodos, tales como los métodos basados en ecuaciones constitutivas del suelo y cuyos resultados muestran que los métodos arrojan respuestas similares.

La Figura 1 presenta un esquema de la secuencia utilizada para el análisis que se resume así:

1. Procesamiento de las señales sísmicas
2. Caracterización de los suelos:

Para caracterizar los suelos se estudian sus propiedades, especialmente las que tienen relación con su comportamiento dinámico.

- a) Espesor y secuencia de los horizontes de suelo.
- b) Propiedades índice de cada horizonte, que contenga como mínimo relaciones masa-volumen.
- c) Velocidad de propagación de ondas en los horizontes, en especial de corte, bien sea medida mediante ensayos de campo o estimada a partir de expresiones compatibles con las condiciones geotécnicas del sitio.
- d) Curvas de la variación de propiedades dinámicas (G y β) con el nivel de deformación.

Una vez caracterizados, se utiliza un algoritmo que selecciona de forma aleatoria los parámetros para el análisis, de acuerdo con la distribución normal de los parámetros del suelo en cada uno de los sitios bajo estudio.

3. Modelación unidimensional del comportamiento visco-elasto-plástico del suelo.

La modelación del comportamiento del suelo ante excitaciones sísmicas que le exijan respuestas más allá del intervalo elástico de su comportamiento, se realiza representando el comportamiento no lineal mediante un modelo unidimensional dependiente de un módulo de rigidez degradado y una fracción de amortiguamiento compatibles con los niveles de deformación alcanzados.

4. Obtención de los espectros de respuesta de un sistema de un grado de libertad en la superficie.

Para cada uno de los perfiles de suelo generados en cada sitio, se calcula el espectro de respuesta correspondiente en superficie.

5. Análisis estadístico de las respuestas.

Se obtienen las medias de los espectros calculados y se establece un intervalo de variación basado en la desviación de estándar.

6. Obtención de espectros de diseño.

Con base en los espectros obtenidos y su análisis estadístico se propone un espectro de diseño para cada zona.

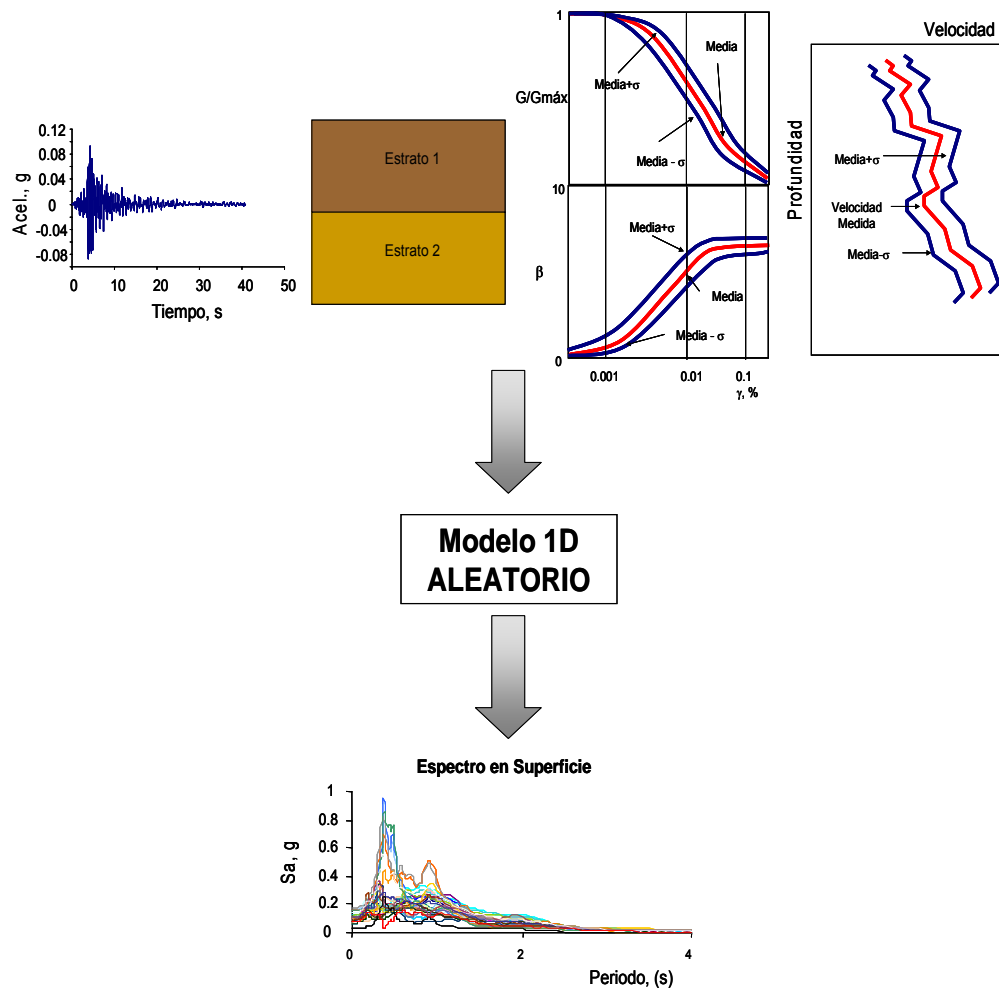


Figura 1. Esquema de la metodología empleada para el análisis unidimensional de los sitios propuestos.



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

5. RECOLECCION Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION QUE SIRVE DE INSUMO PARA LA EVALUACION DE LA RESPUESTA

5.1. Perfiles geotécnicos

Los perfiles se encuentran discriminados por zonas, de acuerdo con las cantidades mostradas en la Tabla 1, en la que se observa que aproximadamente el 50 % de los perfiles carece de información acerca de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s), razón por la cual para la modelación de la propagación de ondas 1D del presente estudio fue necesario desarrollar una serie de correlaciones empíricas entre las propiedades índice y/o la profundidad de acuerdo con la cantidad de datos disponibles. En la Tabla 2 se presentan los datos disponibles en función de la profundidad para cada una de las zonas analizadas. Se observa que la mayor cantidad de datos está concentrada en la humedad y los límites de consistencia, mientras que para el peso unitario son escasos. Esta condición dificulta la evaluación del confinamiento para la selección de las curvas de degradación con el nivel de deformación por cortante. Para la velocidad cubren menos del 50%.

Es importante destacar que en la base de datos del modelo geotécnico no fueron suministrados datos acerca de la posición del nivel freático, que permitiera estimar el grado de saturación de los depósitos.

Tabla 1. Perfiles por zona, suministrados para el análisis.

Zona según determinación actual	No. de perfiles	Perfiles con registro de V_s
1	4	3
2	51	20
3	53	41
4	18	13
5	8	4
Transición 1-2	7	7
Transición 2-3	18	12
Transición 3-4	9	8
Transición 2-5	10	0
Puntos microzonificación	34	0



**ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA**

Tabla 2. Profundidades hasta las cuales se tienen datos en las zonas.

ZONA 1	Prof.	Propiedades			Vs
		w	IP	γ	DH
Z1.01 Carrera 3 con Calle 76	18				18
Z1.02 Calle 32s con Calle 15C	14.5	14.5	14.5	Solo 11.5 y 13.3	
Z1.03 Carrera 7 con Calle 45	15	15	15		15
Z1.04 Carrera 132 con Calles 59-80	15	15	12.8		15

ZONA 2	Prof.	Propiedades			Vs
		w	IP	γ	DH
Z2.01 Carrera 9 con Calle 93	48	48			45
Z2.02 Calle 64 con Carrera 7	22				22
Z2.03 Carrera 30 con Calle 13	28	12 a 19	12 a 19		28
Z2.04 Carrera 13ª entre Calles 31 y 32	39	28	28	28	39
Z2.05 Carrera 8 con Calle 86	24				24
Z2.06 Carrera 7 con Av 39	12				12
Z2.07 Calle 138 con Carrera 60A - 60	17	10	10	7	17
Z2.08 Av Caracas con Calle 53	28	14	14		28
Z2.09 Calle 27 con Carrera 13	47	28	28		47
Z2.10 Calle 26a con Carrera 13	46	40	Sólo 22		46
Z2.11 Calle 67 con Carrera 9	50	30	18	30	50
Z2.12 Carrera 9 con Calle 71	51	51	Sólo 42	Sólo 42	
Z2.13 Carrera 9 con Calle 71	34	34	34		
Z2.14 Calle 68 con Carrera 6	23	23	22		
Z2.15 Calle 40 con Carrera 7	8	8	8		
Z2.16 Carrera 13 con Calle 31	50	38.5	38.5	Sólo 2.5, 5 y 35	50
Z2.17 Carrera 7 con Calle 37	50	49	49	40	50
Z2.18 Carrera 7 con Calle 45	13	13	12		13
Z2.19 Carrera 6 con Calle 40	17	5.3	5.3	5.3	17
Z2.20 Calle 77 con Carrera 3	26	Sólo 9, 20 y 6	Sólo 9, 20 y 6		20
Z2.21 Calle 87 con Carrera 8	25	17	4.5	Sólo 18, 20 y 22	25
Z2.22 Calle 26A con Carrera 13	50	50	50	29	46
Z2.23 Calle 49 con Carrera 7	40	40	40		
Z2.24 Carrera 7 con Calle 36	24.5	24.5	24.5		
Z2.25 Carrera 7 con Calle 61	13	Sólo en 13	13		
Z2.26 Carrera 7 con Calle 65	15	15	15	3.5	12
Z2.27 Calle 41 con Carrera 7	10	3.5		10	



**ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA**

		Propiedades			Vs
Z2.28 Carrera 7 con Calle 41	5	3.25	3.25		5
Z2.29 Carrera 10 con Calle 18	15.5	Sólo en 15.1		15.5	
Z2.30 Carrera 7 con Calle 65	7	7	7		
Z2.31 Calle 55 con Carrera 6	18	18	18		
Z2.32 Calle 62 con Carrera 7	18	18	18		
Z2.32 Carrera 10 con Calle 26	38	38	38		
Z2.33 Carrera 7 con Calle 34	32.5	32.5	33	10.6	
Z2.34 Carrera 7 con Calle 36	32.5	32.5	32.5	10.6	
Z2.35 Calle 23 con Carrera 23	50	40 a 50	40 a 50	42	
Z2.36 Carrera 6 con Calle 55	17	1.2	17		
Z2.37 Carrera 8 con Calle 48	15	16	15		
Z2.38 Calle 67 con Carrera	31	31	31		
Z2.39 Carrera 8 con Calle 48	17	17	17		
Z2.40 Carrera 8 con Calle 46	18.3	18.3	18.3		
Z2.41 Carrera 5 con Calle 26	35	35	35	15	
Z2.42 Carrera 7 con Calle 72	20	20	19		
Z2.43 Carrera 6 con Calle 55	7.2	Sólo a 7.2	Sólo a 7.2		
Z2.44 Carrera 7 con Calle 32	30	30	30		
Z2.45 Calle 47 con Carrera 7	19	19	19		
Z2.46 Calle 72 con Carrera 7	16.7	16.7	16.7		
Z2.47 Carrera 7 con Calle 70	35	35	35		
Z2.48 Carrera 6 con Calle 27	33	33	Sólo 10 y 23	Sólo 10 y 23	
Z2.49 Carrera 7 con Calle 66	4.7	4.7	4.7		
Z2.50 Carrera 7 con Calle 64	39	39	7.9	3.5	

ZONA 3	Prof.	Propiedades			Vs
		w	IP	γ	DH
Z3.01 Calle 43 A con Carrera 68 A bis	50	12 a 16 y 25 a 27	13 a 16 y 25 a 27	3,95- 12,55- 14,65	50
Z3.02 Calle 145 con Carrera 47	50	4,5 - 8,5 - 15 - 44	4,5 - 8,5 - 15 - 45	5,5 - 11 - 11,5 - 30,5	50
Z3.03 Calle 175 con Carrera 39	50	50	50		50
Z3.04 Calle 135 Av Boyaca	50	35	35		50
Z3.05 Diagonal 22 B con carrera 63	44	29.5	29.5	29.5	44
Z3.06 Carrera 30 con Calle 26	44				44
Z3.07 Calle 138 con Carrera 54	50	50	50	10 a 50	50
Z3.08 Calle 144 con carreras 99B a 101	50	50	50	50	50
Z3.09 Calle 143B con Carrera 48	50	50	50	50	50
Z3.10 Calle 191 con Carrera 34	37	37	37	37	



**ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA**

Z3.11 Carrera 43A con Calle 145	50	25	25	25	50
Z3.12 Calle 153 con Carrera 98	50	35	35		
Z3.13 Carrera 52 con Diagonal 22A	50	10 y 30	10 y 30		50
Z3.14 Carrera 45 con Calle 64	50	0-10 y 25 a 50	0-10 y 25 a 50		49
Z3.15 Diagonal 183 con 41	25.6	25.6	25.6	25.6	
Z3.16 Carrera 46A con Calle 135	50	0 a 10 y 30 a 50	1 a 10 y 30 a 50	2 a 10 y 30 a 50	50
Z3.17 Carrera 28 con Calle 165	50	6 a 40	6 a 40	6 a 40	49
Z3.18 Carrera 64 con Calle 170	50	0 a 20	0 a 20	4,4 - 6,4 - 18,5 - 34	48
Z3.19 Diagonal 22 A con 68 D	100	95	95	75	95
Z3.20 Calle 81 con Autopista	100	100	100	75	100
Z3.21 Calle 80 con Escuela Militar	20	20	20	15	20
Z3.22 Calle 63 con Carrera 30	19.8	19.8	19.8		19.8
Z3.23 Calle 26 con Carrera 50	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
Z3.24 Carrera 53 con Calle 13	20.26	20.26	20.26	9,78 y 13,84	20.26
Z3.25 Calle 170 con Autopista Norte	128	128	128	9,78 y 13,85	128
Z3.26 Calle 13 con Avenida Boyaca	24.05	24.05	24.05	22.68	24.05
Z3.27 Carrera 46 con calle 140A	50	47	47	6 a 39	40
Z3.28 Avenida NQS con Calle 26	50	solo 15 24 29	solo 15 24 29		43
Z3.29 Calle 170 con Carrera 31	50	50	50	solo 5 7 20 36 44	50
Z3.30 Calle 134 con Carrera 46A	50	45	45	45	48
Z3.31 Carrera 68B con Calle 43B	50	50	50	50	48
Z3.32 Carrera 52 con Calle 147	50	5 a 50	5 a 50	5 a 50	39
Z3.33 Calle 152 con Carrera 28	50	50	50	50	50
Z3.34 Diagonal 152 con Transversal 43	50	50	50	50	40
Z3.35 Carrera 30 con Calle 6	19.25	19.25	19.25	19.25	19.25
Z3.36 Transversal 32 con Calle 131	50	10 a 30	10 a 30	10 a 35	50
Z3.37 Calle 22C con Carrera 40	50	solo a 4 10 13 15 29 37	solo a 4 10 13 15 29 38	50	
Z3.38 Calle 43A con Carrera 68A Bis	50	4 a 27	4 a 27	4 a 27	50
Z3.39 Calle 72 con Carrera 28	50	solo 25 30 y 40	solo 25 30 y 40	solo 25 30 y 40	
Z3.40 Calle 72 con Carrera 30	46.7	3 a 41	3 a 41	3 a 41	



**ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA**

Z3.41 Calle 72 con Carrera 37	100	100	100	100	
Z3.42 Calle 72 con Carrera 45A	45.6	45.6	45.6	45.6	
Z3.43 Calle 72 con Carrera 50	60	60	60	60	
Z3.44 Calle 72 con Carrera 20	55	solo 25 36 46 55	solo 20 23 25 36 46 56	solo 10 20 25 45	
Z3.45 Calle 72 con Carrera 24	50	50	50	50	50
Z3.46 Calle 13 con Carrera 39	47.65	solo 3 10 13 19 25 31 45	solo 3 10 13 19 25 31 46	solo 8 13 18 38	
Z3.47 Calle 13 con Carrera 35	50.55	50.55	50.55	solo 25 y 29	
Z3.48 Carrera 89C con Calle 42	50	50	50	35	
Z3.49 Carrera 7 con Calle 66	35.95	35.95	35.95	35.95	35.95
Z3.50 Avenida Chile con Avenida Ciudad de Quito	25.15	25.15	20	10	25.15
Z3.51 Avenida Chile con Carrera 31	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4
Z3.52 Calle 53 con Carrera 30	177	177	177	177	177
Z3.53 Carrera 28B con Calle 151					

ZONA 4	Prof.	Propiedades			Vs
		w	IP	γ	DH
Z4.01 Calle 59 A con Carrera 74	50	23	23		50
Z4.02 Carrera 48f con calle 95	50	50	50	42	46
Z4.03 Avenida Calle 100 con Carrera 19	50				50
Z4.04 Calle 127 con Autopista Norte	26.56	26.56	26.56	26.4	26.56
Z4.05 Calle 91 con Carreras 17	50	11 a 46	11 a 46		48
Z4.06 Calle 100 con Autopista Norte	152	49	49	49	152
Z4.07 Calle 68 con Carrera 82	20.2	20.2	20.2	49.32	20.2
Z4.08 Calle 68 con Carrera 86	48.25	41 a 46	42 a 46	solo 2.1 y 30.6	
Z4.09 Calle 68 con Carrera 91	43.55	18.55	18.55	43.55	
Z4.10 Carrera 98 con Calle 68	50.6	50.6	50.6	solo 5 10 20 30 40 50	50.6
Z4.11 Calle 68 con Carrera 102	50.1	40.6	solo 8 y 26	40.6	
Z4.12 Calle 68 con Diagonal 105F	50.1	50.1	48.05	solo 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	
Z4.13 Calle 68 con Carrera 110	100.6	51.05	51.05	100.6	100.6
Z4.14 Calle 68 con Carrera 74A	45.7	45.7	5.7 a 33.1	2.2 a	45.7



**ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA**

				45.7	
Z4.15 Calle 68 con Carrera 76	50.6	solo 5 13 20 28 35 43	solo 5 13 20 28 35 44	solo 8 18 23 30 40 43	50.6
Z4.16 Calle 68 con carrera 82	50	48.15	48.15	45.7	50
Z4.17 Carrera 111 con calle 157	47.37	47.37	47.37	3.86 a 47.37	47.37
Z4.18 Carrera 117 con Calle 68	48.2	48.2		48.2	

ZONA 5	Prof.	Propiedades			Vs
		w	IP	γ	DH
Z5.01 Carrera 92 con Calle 6	50	3.5 a 25.6	3.5 a 25.6	3.5 a 25.6	50
Z5.02 Calle 3 Sur con Carrera 70	50	0.6 a 10 y 31	0.6 a 10 y 32	solo 5 16 31 10	50
Z5.03 Avenida 68 con Calle 30 sur	50	50	50	38.5	50
Z5.04 Transversal 72 A con Calle 12 A	50	50	50	50	50
Z5.05 Carrera 27 con Calle 445	19.6	19.6	17	2 a 15.64	
Z5.06 Diagonal 43 S con Carrera 86	47	47	47		
Z5.07 Diagonal 43 S con Carrera 81	50.45	50.45	50.45		
Z5.08 Diagonal 42 S con Carrera 84	48.95	48.95	8 a 13 y 23 a 48		

5.2. Espesor y orden de aparición de los estratos de suelo

Los espesores de los horizontes no se modificaron con respecto a los archivos suministrados; se distinguieron estratos a partir de la velocidad de propagación de ondas de corte y el índice de plasticidad (IP). Para completar la profundidad hasta roca, se utilizó el mapa de espesor de sedimentos presentado en la Microzonificación de Bogotá, suministrado en el modelo base en formato tipo CAD (969ProfRoca.dwg), que define el límite entre las arenas y arcillas y la roca, fundamentalmente arcillolita o areniscas.

Adicionalmente, en las zonas 3, 4 y transición 2-3 y 3-4 se utilizaron los espesores sugeridos por la Sociedad Colombiana de Geotecnia (comunicación personal), para las tres principales formaciones de Bogotá, los cuales fueron definidos a partir del Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá y el informe "An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin during the last 3 million years", y que se resumen como sigue:

- Formación Chía, desde superficie, con espesores variables entre 5 m y 10 m y presencia esporádica de materiales de relleno antrópico. Esta formación se encuentra conformada principalmente por suelos finos sobre-consolidados.
- Formación Sabana, con espesor variable entre 40 m y 50 m, que alcanza profundidades hasta de 60 m. Se caracteriza por arcillas blandas.
- Transición entre Formación Sabana y Formación Subachoque, conformada por una franja entre 10 m y 20 m de espesor, aproximadamente a 50 m de profundidad.
- Formación Subachoque, desde 50 m a 70 m hasta alcanzar 500 m de profundidad en Funza (occidente de Bogotá), de origen fluvio-lacustre.

5.3. Propiedades índice de cada horizonte

En general, la mayor parte de los perfiles cuentan con valores de humedad natural (ω), e índice de plasticidad (IP), pero fue necesario completar información acerca de los pesos unitarios (γ_h), para lo cual se acudió a la relación masa volumen mostrada a continuación:

$$\gamma_h = G_s \gamma_w \frac{1+w}{1+e}$$

donde: γ_h : Peso unitario del suelo

γ_w : Peso unitario del agua.

G_s : Peso específico relativo de los sólidos, seleccionado a partir del índice de plasticidad (IP), de acuerdo con las variaciones mostradas en la Tabla 3.

e : Relación de vacíos, estimada a partir de la expresión sugerida en el Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá, con la siguiente expresión:

$$e = 0.018IP + 0.5474 .$$

Tabla 3. Valores típicos de peso específico de los sólidos G_s

Mineral predominante	IP (Mitchell, 1993)	IP usados	G_s
Caolinita	25-40	<35	2.60-2.68
Illita	35-60	35-60	2.60-3.00
Esmectita	50-100	>60	2.35-2.60

Con el objeto de verificar la estimación de la relación de vacíos a partir del índice de plasticidad se revisaron los resultados obtenidos en función de la humedad, teniendo en cuenta la relación de fase $eS = wG_s$ (ver Figura 2), donde S es el índice de saturación del suelo y los demás términos son como se han definido más arriba.

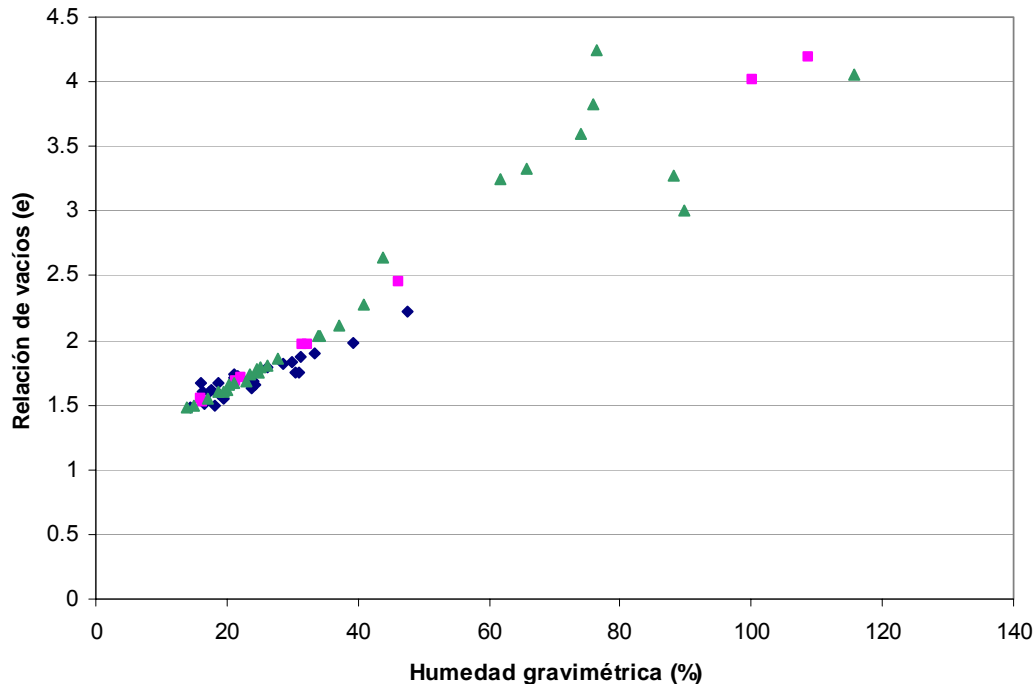


Figura 2. Verificación de la estimación de la relación de vacíos, teniendo en cuenta la humedad y G_s .

5.4. Velocidad de propagación de ondas

En los perfiles donde no se cuenta con la variación de la velocidad de propagación de ondas de corte, V_s , se completan las propiedades a partir de correlaciones establecidas de acuerdo con cada zona como se describe a continuación.

En las correlaciones utilizadas se seleccionaron aquellas de todos los ajustes efectuados a partir de los datos de V_s por cada zona y sus transiciones, dependiendo de la cantidad de información disponible, así; sí sólo se tenían ensayos *down hole* y los perfiles carecían de propiedades índice o pesos unitarios, las correlaciones se desarrollaron en función de la profundidad. Para ello se realizó un análisis de sensibilidad comparando el efecto de relacionar contra la profundidad linealmente o parabólicamente, encontrando que para algunos suelos

al relacionar contra la profundidad al cuadrado, se obtenía mayor dispersión que al hacer la relación lineal, pero que en otros lo contrario era cierto, por lo que se utilizaron las correlaciones que dieran el mejor ajuste en cada caso.

Es importante anotar que por tratarse de correlaciones empíricas a partir de los datos disponibles, las ecuaciones no son dimensionalmente correctas y la corrección por esta situación queda implícita en las constantes de las ecuaciones de ajuste. Esta situación es común en la práctica de la geotecnia, y más en la estimación de las propiedades dinámicas del suelo; así, por ejemplo, la ecuación propuesta por Seed e Idriss (1970), $G_{Max} = 1000K_{2,Max} \sqrt{\sigma'_m}$ para la determinación del módulo de cortante máximo en arenas, aparentemente no es dimensionalmente correcta, y este sólo se estima bien si la tensión σ'_m se introduce en lb/ft².

En el proceso de definición de las correlaciones en cada zona, se verificaron los datos disponibles y se revisaron tanto las ecuaciones que tuvieran en cuenta el comportamiento fenomenológico, como aquellas en las cuales la velocidad de propagación de ondas de corte al igual que el modulo de rigidez a cortante dependen de la plasticidad y la presión de confinamiento, entre otros factores. Sin embargo, en muchos casos las correlaciones de este tipo no mejoraban los ajustes; por esta razón en muchos casos se utilizaron relaciones simples en función de la profundidad. En las Figura 3 a,b,c,d se presentan las estimaciones obtenidas para modelos que relacionan Vs con el confinamiento y las obtenidas linealmente con la profundidad para la zona 1; el coeficiente de correlación entre estimadas y medidas para las primeras es del 78 % mientras que para modelos en función de la profundidad es del 83 %; ligeramente más alto, modelo que genera mejor ajuste.

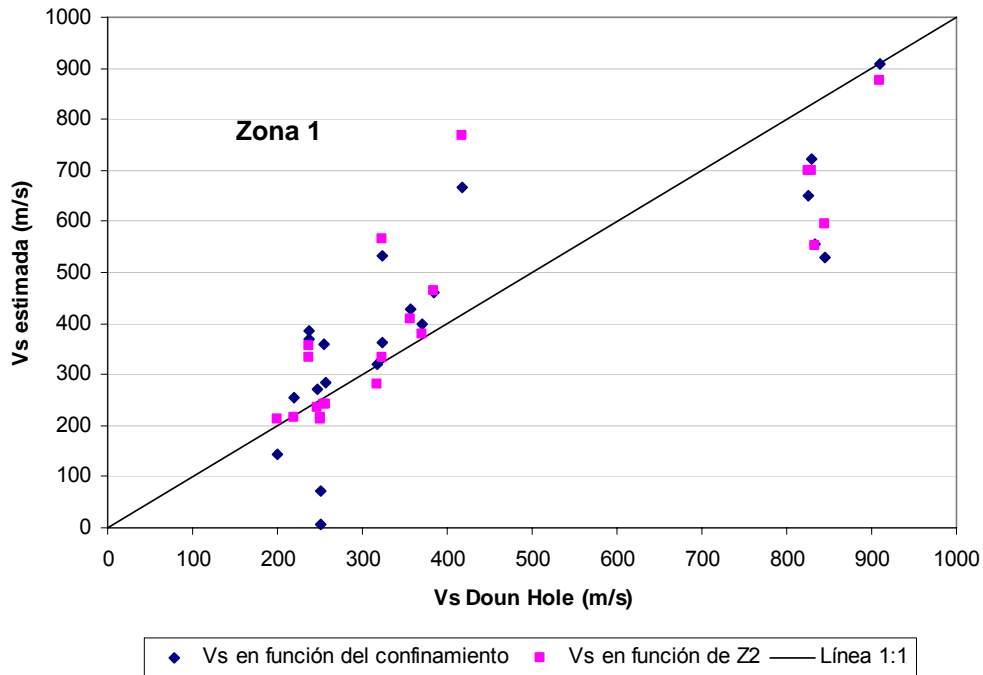


Figura 3 a. Representación de la bondad de las correlaciones para hallar Vs de acuerdo con dos tipos de modelos de regresión. Zona 1.

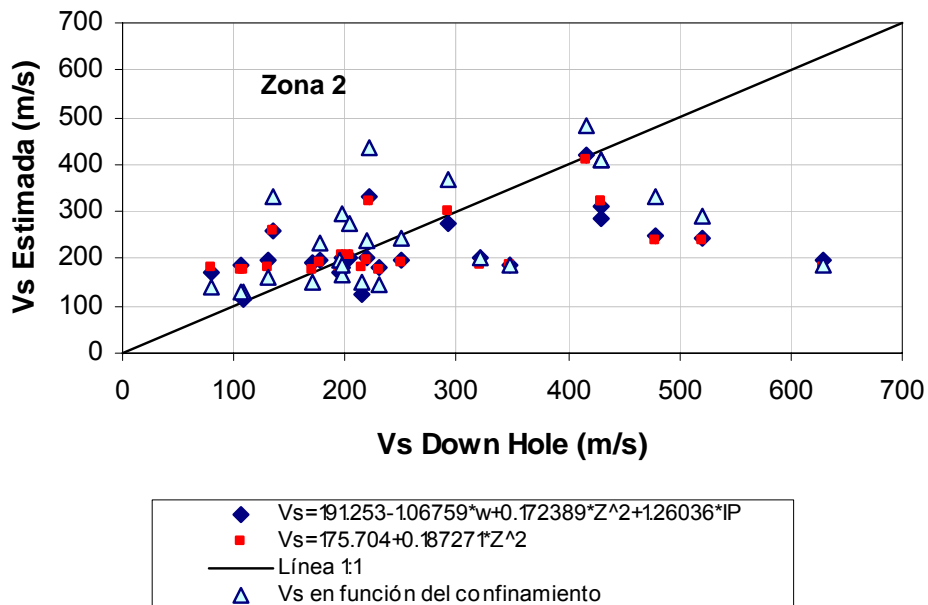


Figura 4 b. Representación de la bondad de las correlaciones para hallar Vs de acuerdo con dos tipos de modelos de regresión. Zona 2.

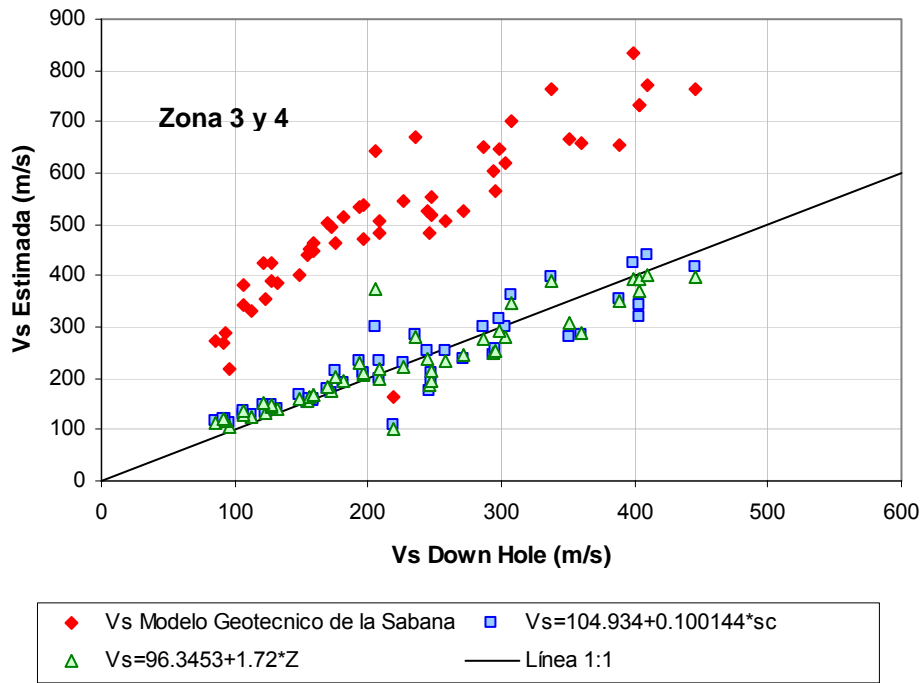


Figura 3 c. Representación de la bondad de las correlaciones para hallar Vs de acuerdo con dos tipos de modelos de regresión. Zonas 3 y 4.

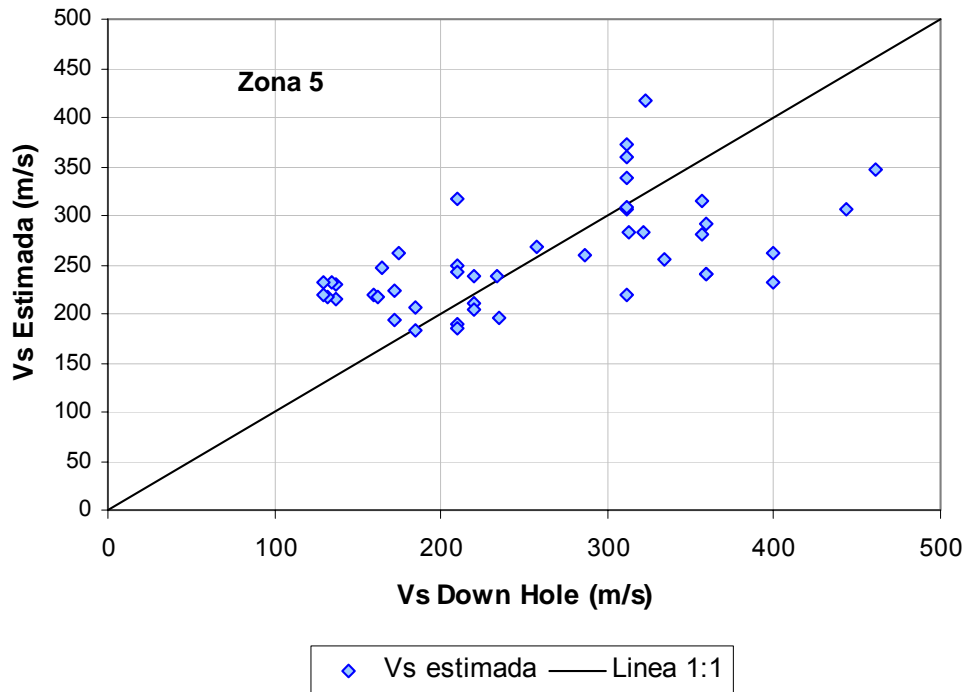


Figura 3 d. Representación de la bondad de las correlaciones para hallar Vs de acuerdo con dos tipos de modelos de regresión. Zona 5.

5.5. Correlaciones por zona

5.5.1 Zona 1

En la zona 1 sólo fue necesario completar un perfil de velocidad de propagación de ondas (sitio Z1.01), lo que se hizo a partir de la correlación con la profundidad mediante la siguiente expresión, calculada con una regresión matemática a partir de la información existente:

$$V_s = 212.578 + 3.38702 \cdot Z^2$$

donde:

Vs: Velocidad de propagación de ondas de corte, en m/s
Z: Profundidad en m.

Esta correlación es válida para profundidades menores de 18 m.

En la Tabla 4 se presentan los valores estadísticos de la regresión, que incluye los valores *t* para las pruebas de hipótesis unilaterales con H_0 nulo, que es el criterio

de rechazo de la hipótesis. Se analizan además, los parámetros para el análisis de varianza, que permiten concluir que la ecuación presenta una relación de significancia entre V_s y Z^2 con un nivel de confianza del 99 %, ya que el valor de probabilidad de la ANOVA es menor que 0.01, representando un 68.5 % de la variabilidad para V_s .

Tabla 4. Resumen estadístico del mejor ajuste para V_s en función de Z^2 , zona de transición 3-4.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P
Constante	212.578	45.4282	4.67944	0.0002
Pendiente	3.38702	0.526437	6.43385	0.0000

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	862198.0	1	862198.0	41.39	0.0000
Residual	395748.0	19	20828.9		
Total (Corr.)	1.25795E6	20			

Coefficiente de correlación = 0.82789
 $R^2 = 68.5401\%$

5.5.2 Zona 2

En la zona 2 sólo el 40 % de los perfiles tienen la variación de la velocidad de propagación de ondas de corte y por tanto fue necesario completar los datos mediante la utilización de correlaciones dependiendo del tipo de datos disponibles, a partir de la profundidad, la humedad y el índice de plasticidad como sigue:

$$V_s = 191.253 - 1.06759 \cdot \omega + 0.172389 \cdot Z^2 + 1.26036 \cdot IP$$

donde:

- V_s : Velocidad de propagación de ondas de corte en m/s;
- ω : Humedad natural en porcentaje
- Z : Profundidad en m
- IP : Índice de plasticidad en porcentaje.

Esta correlación es válida sólo para espesores menores de 50 m, cubriendo bien la zona, ya que el espesor promedio de suelo es del orden de 32 m.

En la Tabla 5 se presentan los valores estadísticos de la regresión, incluyendo los valores t para las pruebas de hipótesis unilaterales con H_0 nulo, que es el criterio de rechazo de la hipótesis y Z^2 , de acuerdo con los mismos se acepta H_0 para ω e

IP; sin embargo, descartar estos parámetros en la regresión reduce un poco la representación de la variabilidad, la cual es igual 53 % de la variabilidad para V_s . De manera alternativa, V_s puede estimarse mediante la expresión:

$$V_s = 175.704 + 0.187271 \cdot Z^2.$$

Tabla 5. Resumen estadístico del mejor ajuste para V_s en función de la humedad natural, la profundidad e índice de plasticidad para la zona 2.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P
Constante	191.253	18.9326	10.1018	0.0000
W	-1.06759	0.577863	-1.84748	0.0679
Z^2	0.172389	0.020391	8.45418	0.0000
IP	1.26036	1.0395	1.21247	0.2285

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	893035.0	3	297678.0	34.24	0.0000
Residual	791174.0	91	8694.22		
Total (Corr.)	1.6821E6	94			

$R^2 = 53.024\%$

Otra alternativa puede ser estimar V_s en función de la profundidad mediante la siguiente expresión $V_s = 217.56^{0.0194 Z}$ la cual sólo representa un 38 % de la variabilidad de V_s .

5.5.3 Zonas 3 y 4 y transición 3-4

Para la formación Chía y Sabana, donde se tienen el peso unitario (γ_h) y el índice de plasticidad (IP), se utilizaron las correlaciones propuestas en el modelo Geotécnico de la Sabana.

$$G_0 = K \cdot f(e) \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma_{ref}} \right)^m OCR^k$$

donde,

K = Constante que depende del tipo de material.

σ'_c = Esfuerzo de confinamiento efectivo.

σ_{ref} = Esfuerzo de referencia (usualmente 100 KPa).

m = Exponente de la relación de esfuerzos

OCR = Relación de sobreconsolidación



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

k = Exponente de la relación de sobreconsolidación.

F (e) esta dado por la siguiente expresión (Hardin y Black, 1968):

$$f(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$$

Para los valores de K y k se utilizaron las correlaciones propuestas con el índice de plasticidad:

$$K = 3056.4IP + 31031 \pm \bar{\sigma}$$

$$k = -0.00004IP^2 + 0.0145IP$$

En los perfiles donde no se cuenta con la información necesaria se emplean los siguientes niveles de variación:

- Formación Chía, con Vs entre 80 m/s y 150 m/s, desde superficie, con espesores variables entre 5 m y 10 m y presencia esporádica de materiales de relleno antrópico. Esta formación se encuentra conformada principalmente por suelos finos sobreconsolidados.
- Formación Sabana, con espesor variable entre 40 m y 50 m, que alcanza profundidades hasta de 60 m. Se caracteriza por arcillas blandas con valores de Vs entre 100 m/s y 150 m/s.
- Transición entre Formación Sabana y Formación Subachoque, conformada por una franja entre 10 m y 20 m de espesor, aproximadamente a 50 m de profundidad. Vs pasa de 150 m/s a 200 m/s o más, aumentando en profundidad.
- Formación Subachoque, desde 50 m a 70 m hasta alcanzar 500m de profundidad en Funza (occidente de Bogotá), de origen fluvio-lacustre entre 200 m/s y 350 m/s, aumentando en profundidad.
- Arcillolita o areniscas, Vs de 700 m/s.

De manera alternativa, en la zona de transición 3-4 se establecieron regresiones lineales para completar los perfiles zonas con datos de propiedades índice en función de la presión de confinamiento y en función de la profundidad para zonas sin datos de propiedades índice.

Perfiles con propiedades índice, para profundidades hasta 175 m:

$$V_s = 104.934 + 0.100144 \cdot \sigma'_c$$

donde:

V_s : Velocidad de propagación de ondas de corte en m/s

σ'_c : Presión de confinamiento en kPa.

En la Tabla 6 se presenta los valores estadísticos de la regresión, incluyendo los valores t para las pruebas de hipótesis unilaterales con H_0 nulo, los cuales implican el rechazo de la misma; incluyendo los parámetros para el análisis de varianza, que permiten concluir que la ecuación presenta una relación de significancia entre la velocidad de propagación de ondas de corte V_s y la presión de confinamiento σ'_c con un nivel de confianza del 99%, ya que el valor de probabilidad de la ANOVA es menor que 0.01. Representando un 83.5% de la variabilidad para V_s .

Tabla 6. Resumen estadístico del mejor ajuste para V_s en función de σ'_c , zona de transición 3-4.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P	
Constante	104.934	9.51309	11.0304	0.0000	
σ'_c	0.0845158	0.00636057	15.7445	0.0000	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	405138.0	1	405138.0	247.89	0.0000
Residual	80082.8	49	1634.34		
Total (Corr.)	485221.0	50			
Coeficiente de correlación = 0.913759					
$R^2 = 83.4956\%$					

En los perfiles sin propiedades índice se utilizó la siguiente correlación:

$$V_s = 96.3453 + 1.72 \cdot Z$$

Donde, V_s , es la velocidad de propagación de ondas de corte, en m/s; Z , es la profundidad en m. Correlación válida para profundidades menores de 178 m.

En la Tabla 7 se presentan los valores estadísticos de la regresión, incluyendo los valores t para las pruebas de hipótesis unilaterales con H_0 nulo, que es el criterio de rechazo de la hipótesis; incluyendo los parámetros para el análisis de varianza, que permiten concluir que la ecuación presenta una relación de significancia entre la velocidad de propagación de ondas de corte V_s y la profundidad Z con un nivel de confianza del 99 %, ya que el valor de probabilidad de la ANOVA es menor que 0.01. Representando un 82.8 % de la variabilidad para V_s .

Tabla 7. Resumen estadístico del mejor ajuste para Vs en función de z, zona de transición 3-4.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P	
Constante	96.3453	10.1878	9.4569	0.0000	
Pendiente	1.72593	0.112312	15.3672	0.0000	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	401842.0	1	401842.0	236.15	0.0000
Residual	83379.6	49	1701.63		
Total (Corr.)	485221.0	50			
Coeficiente de correlación = 0.910034					
R ² = 82.8162%					

5.5.4 Zona 5

La velocidad de propagación para la zona 5 se estima con la siguiente expresión:

$$V_s(m/s) = 153.529 + 285 \cdot f(\sigma'_c, e) \quad f(\sigma'_c, e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \left(\frac{\sigma'_c}{100} \right)^{0.30}$$

En la Tabla 8 se presentan los valores estadísticos de la regresión, incluyendo los valores t para las pruebas de hipótesis unilaterales con H₀ nulo, que es el criterio de rechazo de la hipótesis; incluyendo los parámetros para el análisis de varianza.

Tabla 8. Resumen estadístico del mejor ajuste para Vs en función de $f(\sigma'_c, e)$, Zona 5

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico t	Valor P	
Intercepto	153.529	24.5925	6.24293	0.0000	
Pendiente	285.823	60.5654	4.71925	0.0000	
Análisis de varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Media	Razón F	Valor de prob.
Modelo	127039.0	1	127039.0	22.27	0.0000
Residual	245278	56	5704.15		
Total (Corr.)	372317.0	57			
Coeficiente de correlación = 0.584133					
R ² = 34.12%					

Los datos de esta tabla permiten concluir que la ecuación presenta una relación de significancia entre la velocidad de propagación de ondas de corte V_s y la función $f(\sigma'_c, e)$ con un nivel de confianza del 99%, ya que el valor de probabilidad de la ANOVA es menor que 0,01. Representando un 34 % de la variabilidad para V_s .

5.6. Curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento en función de la deformación por cortante

Las curvas de degradación y fracción de amortiguamiento crítico para cada formación, se definieron con base en una banda acotada por tres curvas en función del índice de plasticidad y la tensión de confinamiento, de acuerdo con los modelos compatibles para cada sitio.

De acuerdo con la información del Modelo Geotécnico de la Sabana, MGS, las zonas y transiciones objeto de análisis pueden agruparse con base en materiales predominantes en lo que respecta a secuencias de suelos de acuerdo con su comportamiento dinámico, tal como se discrimina en la Tabla 9.

Tabla 9. Agrupación de zonas homogéneas de acuerdo con la frecuencia de aparición de tipos de suelos.

Grupo	Zona	Características
1 – Cerros	Zona 1	Presencia de depósitos y suelos residuales de rocas sedimentarias de poco espesor, sobre areniscas duras y arcillolitas, con profundidades de suelo inferiores a los 15 m.
2 - Pie de Monte	Transición 1-2 Zona 2	Superposición de acumulación de sedimentos y suelos residuales donde predominan los conos de deyección. Con espesores de suelo promedio de 30 m y un coeficiente de variación del 38%.
3 - Depósitos lacustres	Transición 2-3 Zona 3 Transición 3-4 Zona 4	Presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad en superficie. Los sedimentos conforman depósitos con espesores promedio de 190 m, variando entre 25 m y 400 m, con un coeficiente de variación del 42%. Arcillas de alta plasticidad con valores medios del orden del 90% para el índice de plasticidad, y coeficientes de variación superiores al 42%.
4 - Depósitos aluviales	Zona 5 Transición 2-5	Suelos duros, arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos aluviales, con espesores promedio de 164 m y un coeficiente de variación del 49% para la zona 5, y de 42 m para la transición con una variabilidad del 44%. En general

Grupo	Zona	Características
		corresponden a suelos de baja plasticidad con una media geométrica de 22 para el índice de plasticidad.

Para cada zona, se definieron las curvas de degradación del módulo de rigidez a cortante y fracción de amortiguamiento crítico para cada formación, con base en una banda definida por tres curvas en función del índice de plasticidad y la tensión de confinamiento, de acuerdo con los modelos compatibles para cada sitio.

5.6.1 Curvas de materiales en la zona 1

Tal como se describe en la Tabla 9, esta zona se caracteriza por la presencia de suelos de poco espesor, correspondientes a depósitos y suelos residuales de areniscas y arcillolitas, rígidos, con velocidades promedio de 290 m/s y un coeficiente de variación del 22 %; suelos que corresponden a materiales de baja plasticidad, entre 9 y 21, que ocasionalmente presentan valores de 40, variación que no sigue ninguna tendencia con la profundidad (ver Figura 5). En este caso, se utilizaron dos conjuntos de curvas: el primero correspondiente a las arenas reportadas por Seed e Idriss (1970), y Rollings (1990), y materiales de baja plasticidad del sondeo N9A reportadas por el INGEOMINAS (ver Figura 6); y el segundo, correspondiente a curvas obtenidas por Leong et al. (2003) en suelos residuales de rocas sedimentarias (ver Figura 7).

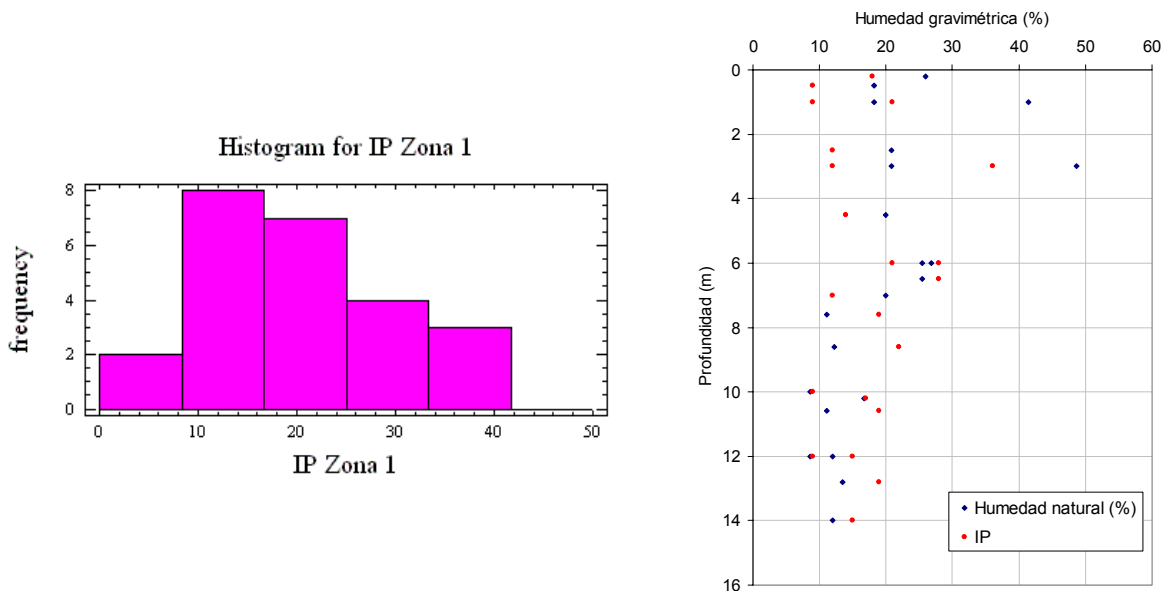


Figura 5. Histograma de frecuencias para el índice de plasticidad en la Zona 1.

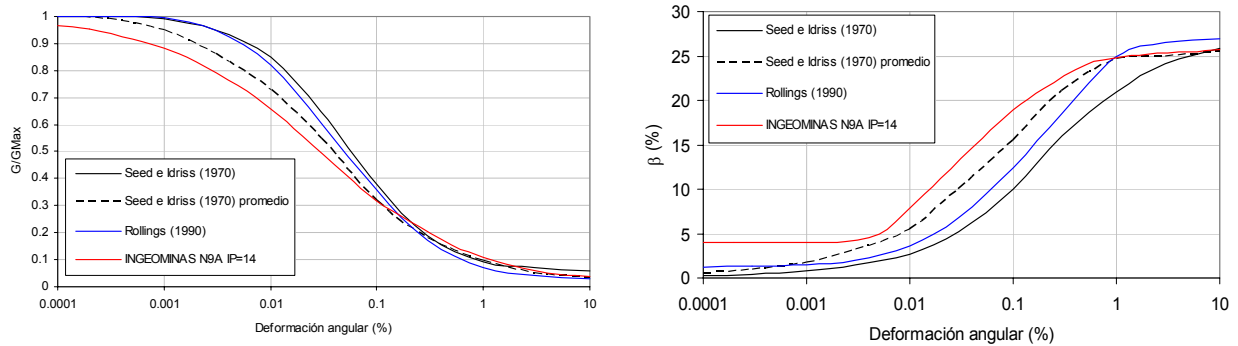


Figura 6. Familias de curvas utilizadas en el grupo 1 de la Zona 1, correspondientes a arenas.

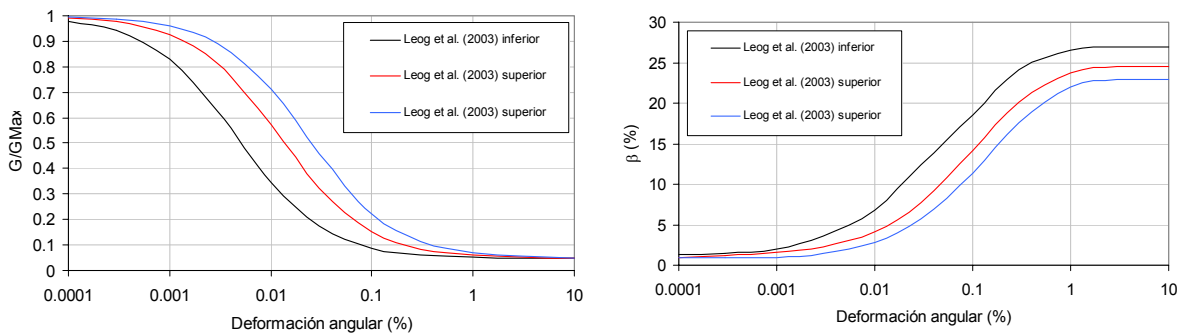


Figura 7. Familias de curvas utilizadas en el grupo 2 de la Zona 1, correspondientes a suelos residuales de rocas sedimentarias.

5.6.2 Curvas de materiales en la zona 2

La zona 2, pie de monte, se caracteriza por la acumulación de sedimentos, donde predominan los conos de deyección sobre suelos residuales de las areniscas y arcillolitas. En general, corresponden a suelos de baja plasticidad con un IP cercano a 20 (Figura 8). Por similitud se emplearon las curvas de los grupos 1 y 2 utilizadas en los cerros (mostradas en la Figura 6 y la Figura 7), adicionando las curvas seleccionadas para la formación Chía, arcillas superficiales de media a alta plasticidad mostradas en la Figura 12.

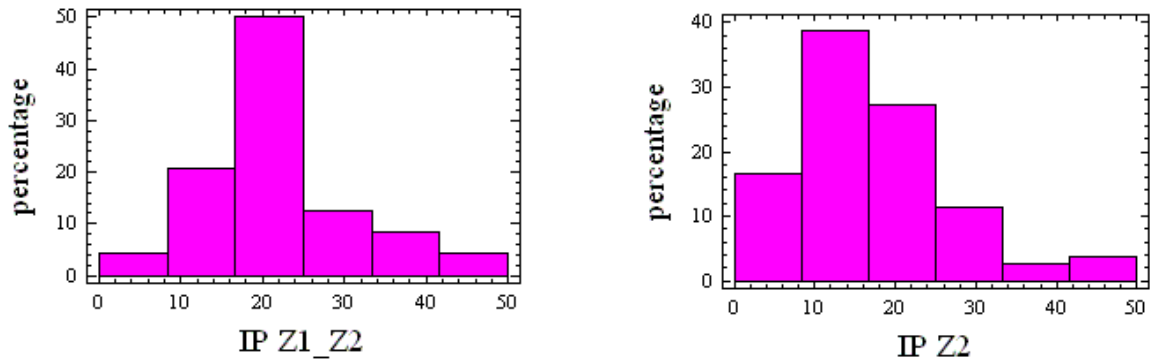


Figura 8. Histogramas del índice de plasticidad; izquierda transición 1-2; derecha zona 2.

Comparativamente, el histograma de frecuencias del IP para la formación Chía en la Z-4 tiene un total de 72 datos (Figura 9). Alcanza un valor máximo de 194 y el mínimo supera los 4 puntos, distribución con una media geométrica de 91.8 y aritmética de 103.1, con un coeficiente de variación del 40%.

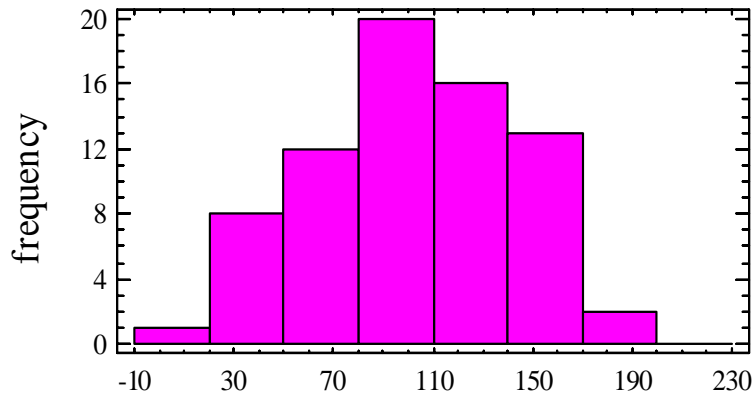


Figura 9. Histogramas del índice de plasticidad de la formación Chía en la Zona 4.

A su vez, el histograma de frecuencias del IP para la formación Sabana en la Z-5 tiene un total de 232 datos (Figura 10). Presenta valores mínimos de 10.5 y máximos atípicos superiores a 297, con una media aritmética de 98 y un coeficiente de variación de 43%.

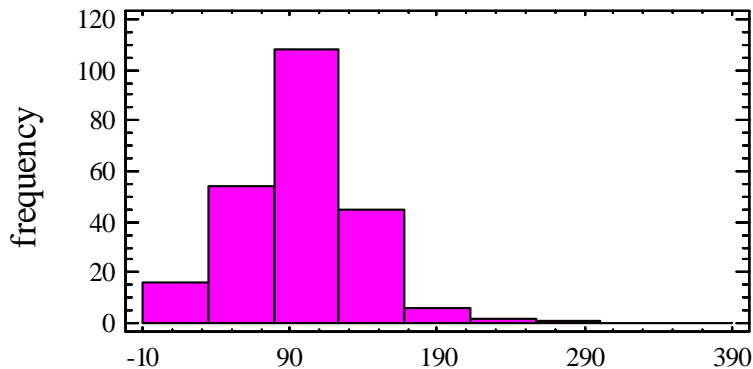


Figura 10. Histogramas del índice de plasticidad de la formación Sabana en la Zona 5.

Los histogramas anteriores corroboran la tendencia promedio de los materiales al presentar una alta plasticidad con valores medios del IP superiores a 90 puntos, condición en la cual, la plasticidad controla el comportamiento dinámico, independiente de la presión de confinamiento.

5.6.3 Curvas de materiales en las zonas 3 y 4

Con referencia a la caracterización de las propiedades dinámicas de los suelos agrupados en las zonas 3 y 4, de depósitos lacustres, en especial la variación del módulo de rigidez a cortante (G) y la fracción de amortiguamiento crítico (β) con el nivel de deformación, se utilizaron las curvas propuestas por Dobry y Vucetic (1991) e Ishibashi Zhang (1993), que presentan las variaciones de G/G_{MAX} y β con la deformación por cortante en función del índice de plasticidad; y el índice de plasticidad y la presión de confinamiento, tal como se presenta en la Figura 11.

Las curvas de degradación del modulo de rigidez contra el nivel de deformación, a partir del modelo de Ishibashi y Zhang (1993), fueron modificadas por los factores de ajuste de tendencia sugeridos en el capítulo 6 del Modelo Geotécnico de La Sabana, mientras que las curvas de amortiguamiento se tomaron iguales a las reportadas por Ishibashi y Zhang (1993).

En las dos familias de curvas, rigidez y amortiguamiento, se incluyó la variabilidad de las propiedades a partir de una banda definida por tres curvas. La variabilidad de las curvas de amortiguamiento incluyó un valor mínimo del 1.0% para el amortiguamiento en las formaciones Chía y Sabana, de acuerdo con las ecuaciones de Ishibashi y Zhang (1993), y una banda más amplia para la formación Subachoque, con niveles entre 0,5 y 2,0 veces los valores de las

ecuaciones de Ishibashi y Zhang (1993), tal como se sugiere en el Modelo Geotécnico de La Sabana, siguiendo las tendencias de las curvas de Dobry y Vucetic (1991). Los amortiguamientos mínimos son introducidos directamente en el código del *SHAKE91* para la primera iteración, y estos se introdujeron con los valores señalados, variando entre 0.5% y 1%.

Para definir las familias de curvas para utilizar en el análisis se tiene en cuenta la variación del IP con la profundidad para cada uno de los cuatro cuerpos: Chía desde superficie, con espesores variables entre 5 m y 10 m (Figura 12), Sabana con espesor variable entre 40 m y 50 m (Figura 13), y Subchoque desde 50 m a 70 m hasta alcanzar la roca (Figura 14), y finalmente la arcillolita o arenisca.

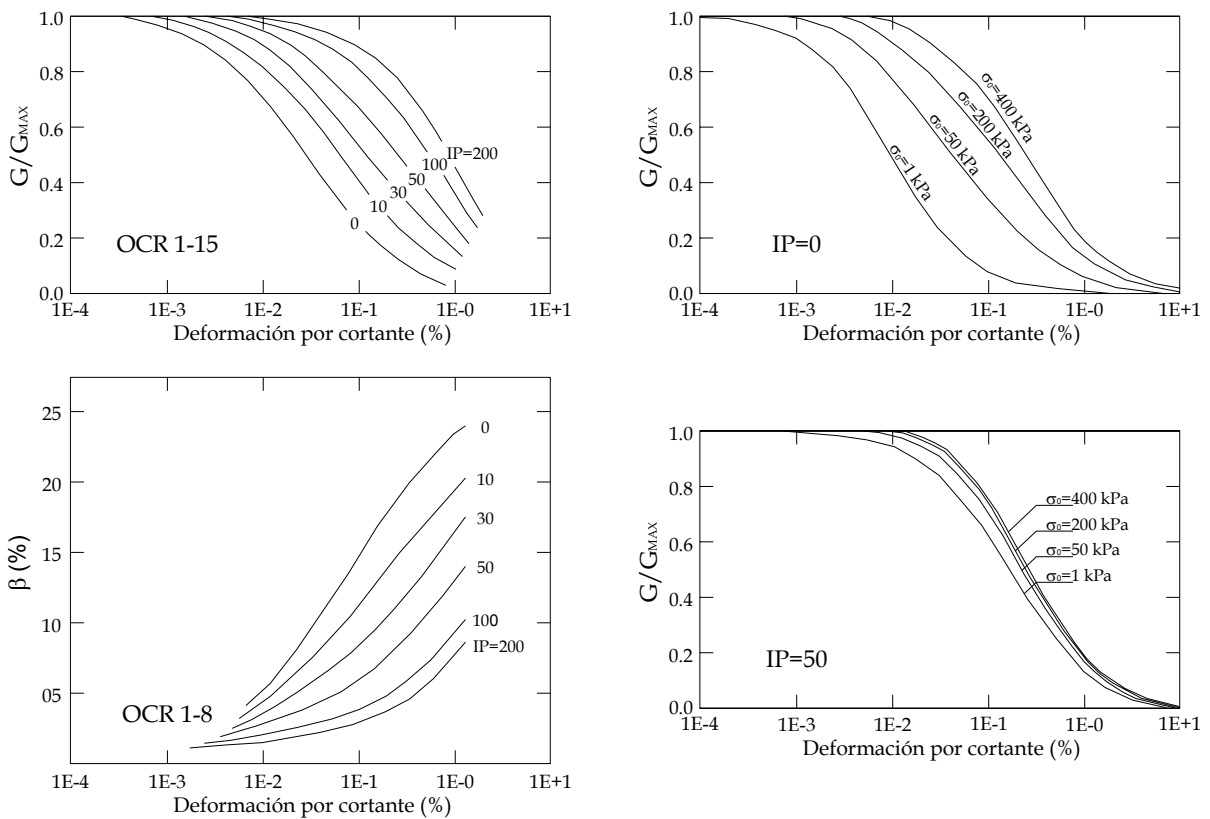


Figura 11. Izquierda; efecto de la plasticidad (Dobry y Vucetic, 1991), derecha; efecto de la presión de confinamiento de acuerdo con la plasticidad (Ishibashi Zhang, 1993).

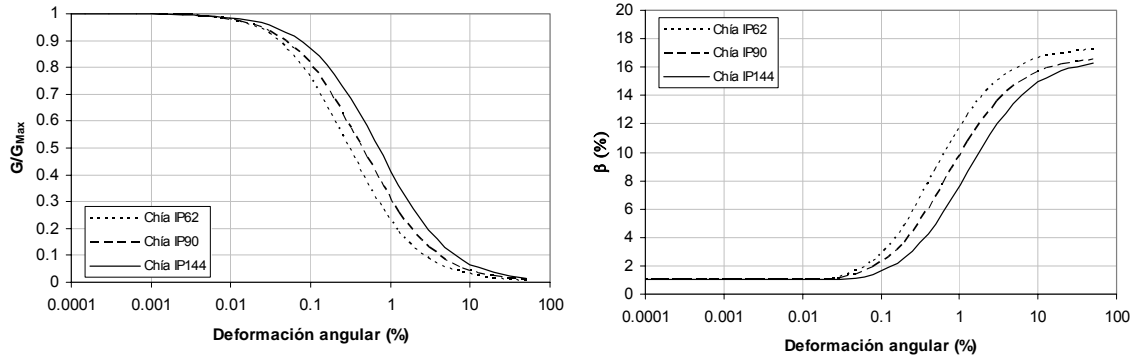


Figura 12. Familias de curvas utilizadas en la formación Chía.

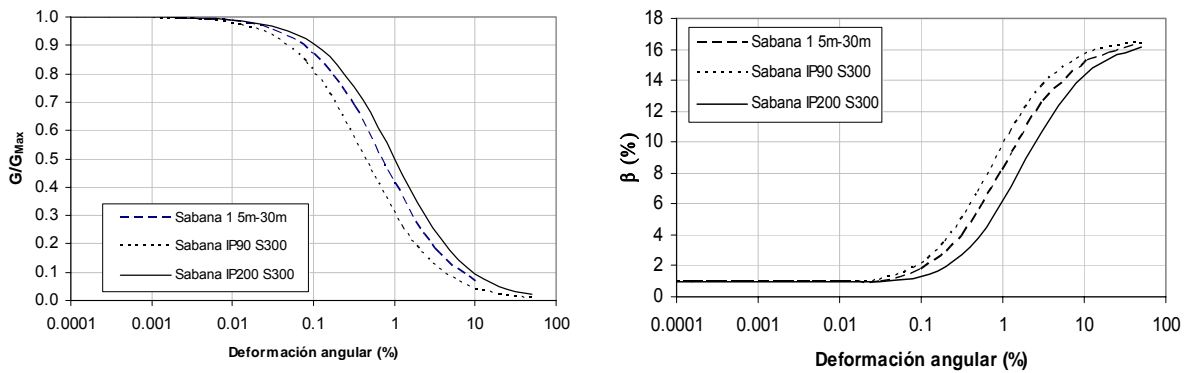


Figura 13. Familias de curvas utilizadas en la formación Sabana.

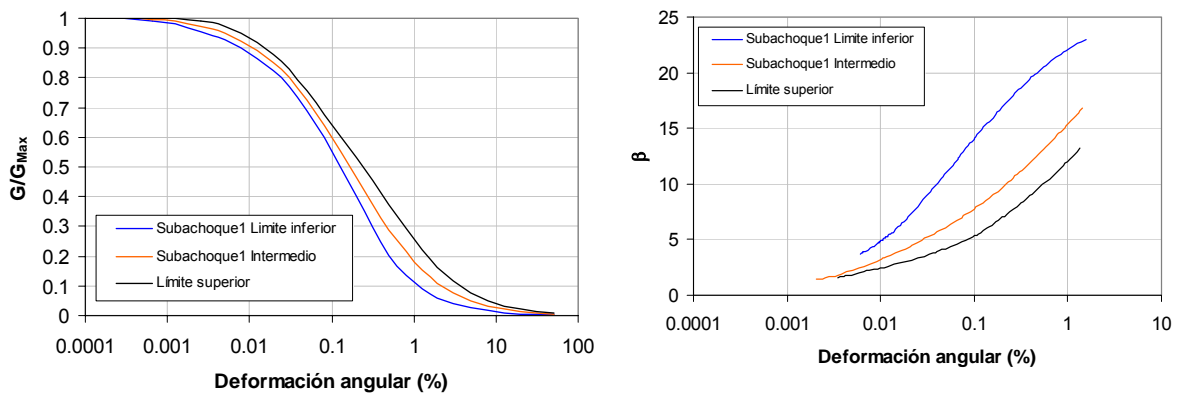


Figura 14. Curvas planteadas para la formación Subachoque

Para la formación Subachoque el confinamiento puede variar entre 600 kPa y 3200 kPa, mientras que el índice de plasticidad presenta valores promedio de 33 y 49, con modas de 20 y 50 (ver Figura 15 y Figura 16), de acuerdo con los datos reportados para la Zona 3 y la Transición 3-4. Con el modelo base empleado, Ishibashi Zhang (1993), y teniendo en cuenta lo anterior el efecto de la presión de confinamiento es bajo (ver Figura 11). Siguiendo la banda seleccionada para confinamientos altos o plasticidad alta la variación en el confinamiento está cubierta por la banda propuesta.

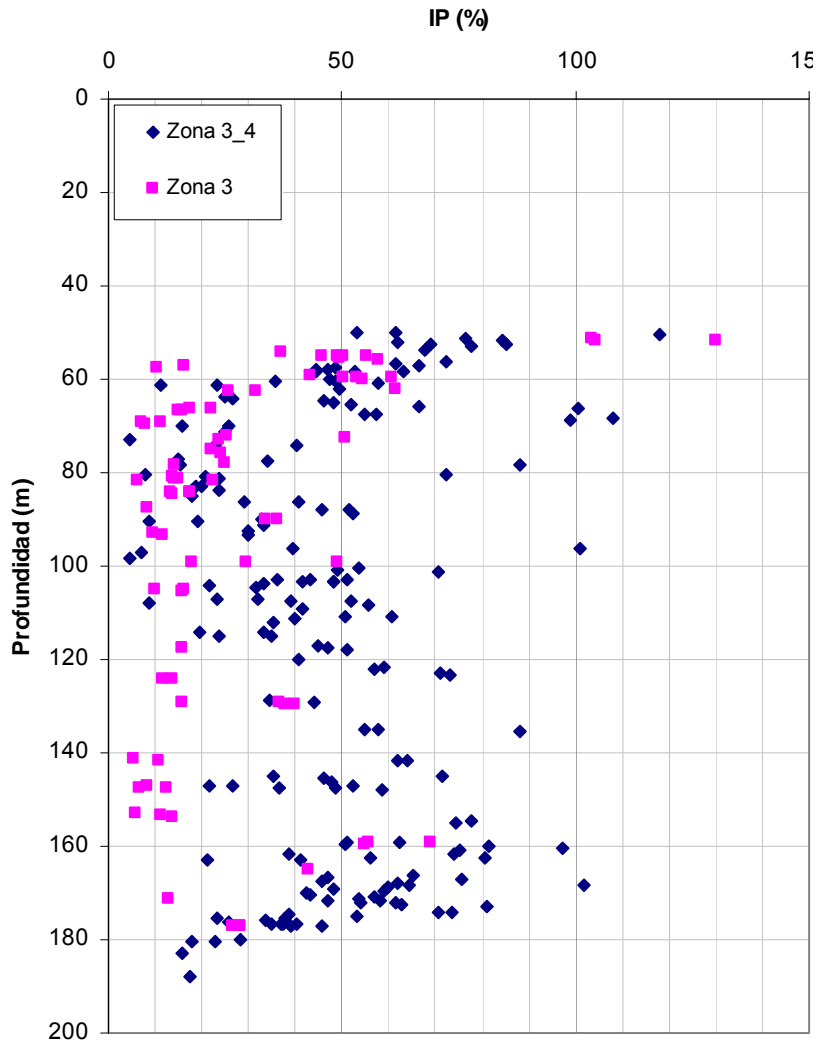


Figura 15. Variación de la plasticidad en función de la profundidad para la formación Subachoque.

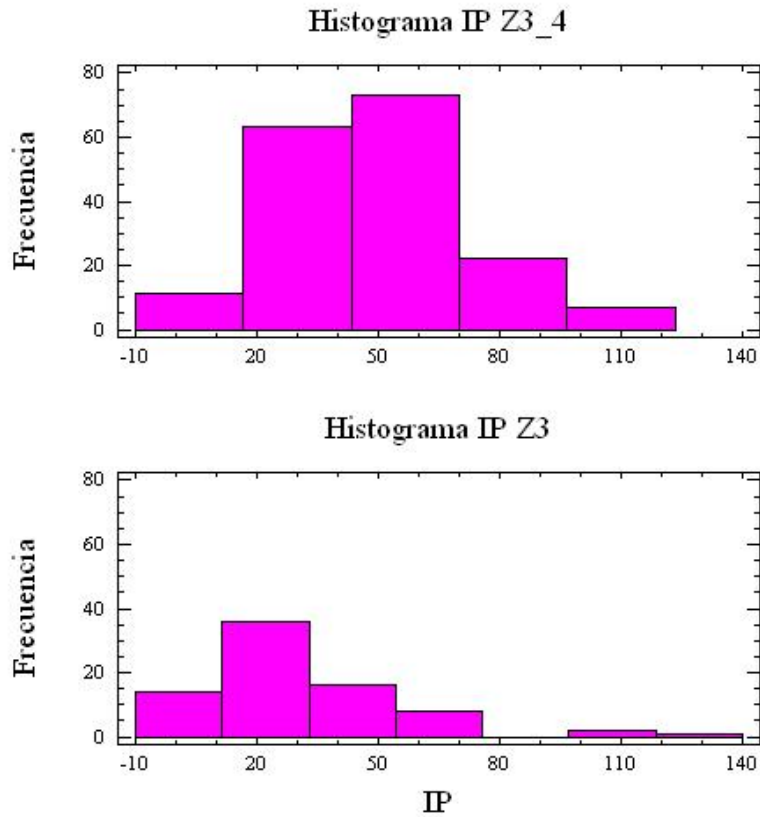


Figura 16. Histogramas de frecuencia para el índice de plasticidad en la formación Subchoque de acuerdo con la zona.

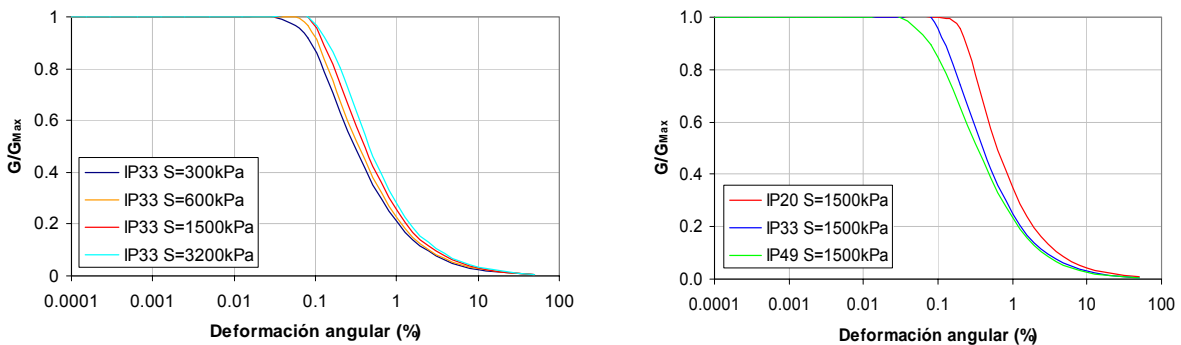


Figura 17. Efecto de la presión de confinamiento y el índice de plasticidad en la curva de degradación del módulo de rigidez para la formación Subchoque en la Zona 3. Modelo de Ishibashi Zhang (1993) sin modificar.

5.6.4 Curvas de materiales en la zona 5

Para la zona 5, de depósitos aluviales, se utilizaron las mismas curvas de la zona de cerros, mostradas en la Figura 6 para los depósitos de arenas y en la Figura 7 para los suelos residuales, los cuales sólo se tuvieron en cuenta en algunos sitios en los cuales la velocidad de propagación de ondas de corte y los valores del índice de plasticidad eran similares a los obtenidos en la Zona 1 para los suelos residuales.

5.7. Registros sísmicos

El análisis de respuesta dinámico se hizo para eventos sísmicos históricos de diferentes fuentes sismogénicas, propuestos por INGEOMINAS y suministrados por la DPAE (Figura 18). Los análisis básicos realizados sobre dichos eventos muestran que las aceleraciones espectrales cubren diferentes bandas de frecuencias que representan los sismos provenientes de fuentes sismogénicas que amenazan la ciudad, clasificadas en tres grupos con base en la distancia hipocentral, en fuentes locales, intermedias y lejanas.

Las señales propuestas por el INGEOMINAS por sismofuente y sus características principales se presentan en la Tabla 10. En general se destacan varios aspectos que diferencian los eventos sísmicos seleccionados para representar cada una de las sismofuentes: la aceleración y la duración del tren de ondas principal y el contenido frecuencial. La selección realizada por INGEOMINAS / DPAE para la sismofuente *Local* se caracteriza por eventos que alcanzan aceleraciones hasta de 0.98 m/s^2 (0.1 g) con un tren de onda muy definido de corta duración (aproximadamente 1 s). Los sismos asociados a la sismofuente *intermedia* alcanza aceleraciones de 0.07 g con un tren de onda principal entre los 3 y 4 s. Finalmente, la sismofuente *Lejana* se caracteriza por aceleraciones pequeñas que alcanzan los 0.03 s pero cuya duración esta próxima a los 10 s. De este último grupo se excluyó para este trabajo el evento de *Xaltinguis*, debido a las características del registro que no correspondían a las de los demás eventos de fuente lejana. Por otro lado es de anotar que en el grupo de los sismos asociados a la fuente intermedia el denominado “Loma Prieta Yerbabuena” presenta un contenido frecuencial con diferencias a los otros del mismo grupo por lo que los resultados donde él se emplee deben analizarse con criterio.

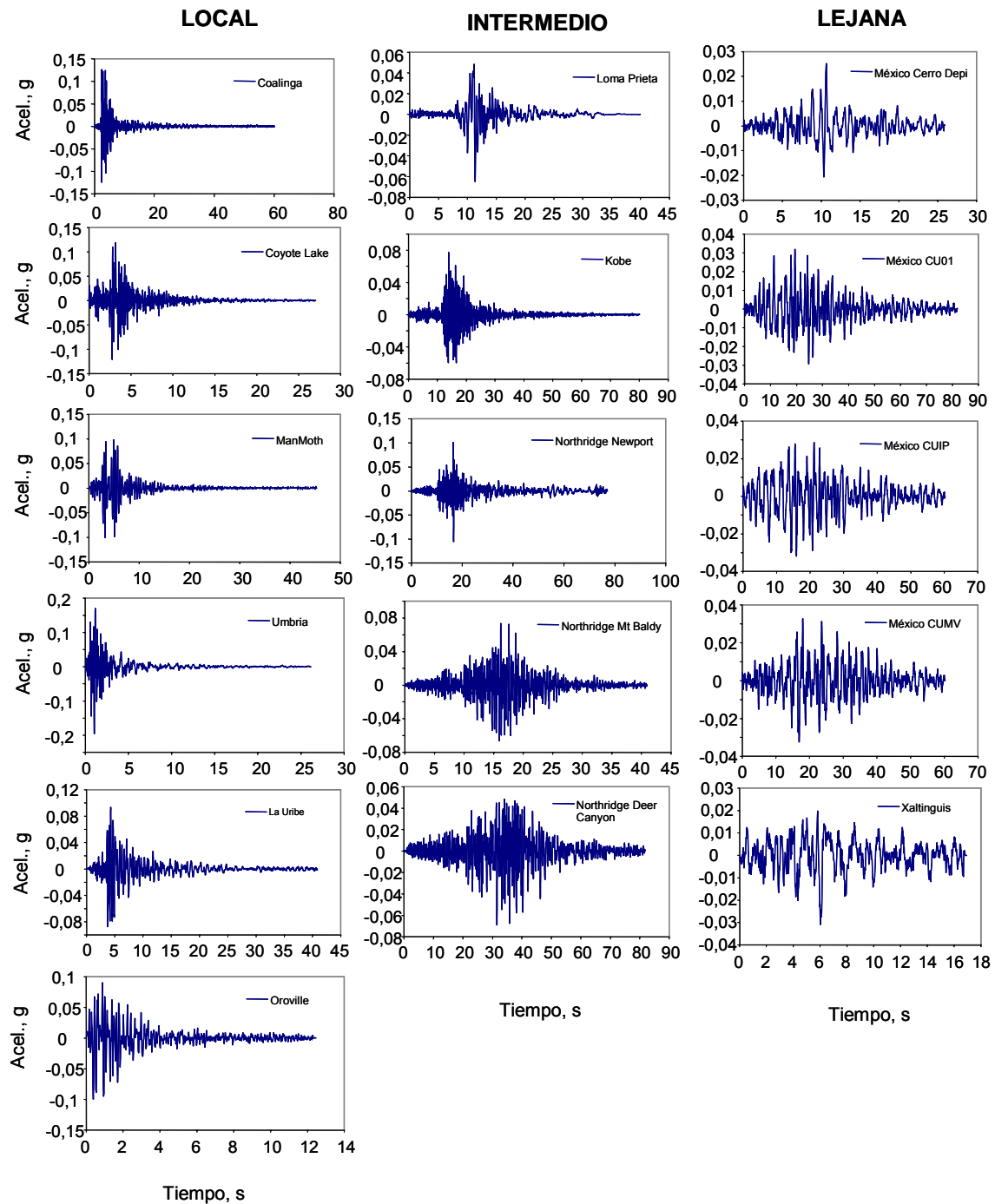


Figura 18. Eventos sísmicos empleados en los análisis dinámicos. El evento Xaltinguis se presenta pero fue excluido de los análisis.

Tabla 10. Principales características de los eventos seleccionados para el análisis dinámico.

SISMOFUENTE	$A_{m\acute{a}x}$ (g)	Duración tren principal (s)
LOCAL		
Coalinga	0.12	2 – 3
Coyote Lake	0.12	3 – 4
Manmoth	0.09	3 – 6
Umbria	0.17	0.5 – 2
La Uribe	0.08	4 – 5
Oroville	0.09	0.5 – 2
INTERMEDIA		
NorthRidge Newport	0.1	14 – 17
NorthRidge Mt. Baldy	0.07	15 – 19
Loma Prieta Yerbabuena	0.06	10 – 13
NorthRidge Deer Canyon	0.07	31 – 38
Kobe Okayama	0.07	10 – 13
LEJANA		
México CU01	0.03	15 – 25
México CUIP	0.03	14 – 22
México CUMV	0.03	16 – 28
México Cerro DEPI	0.03	9 – 11

En la Figura 19 se muestran los espectros de Fourier para analizar el contenido de frecuencias de los eventos sísmicos propuestos por la DPAE. En la figura se observa que las frecuencias predominantes varían entre 1 Hz y 6 Hz. Las sismofuentes *Local* e *Intermedia* presentan sismos con un amplio contenido de frecuencia que varía entre 2 Hz y 6 Hz aproximadamente. Para la sismofuente *Lejana* este contenido frecuencial es estrecho, entre 1 y 2 Hz.

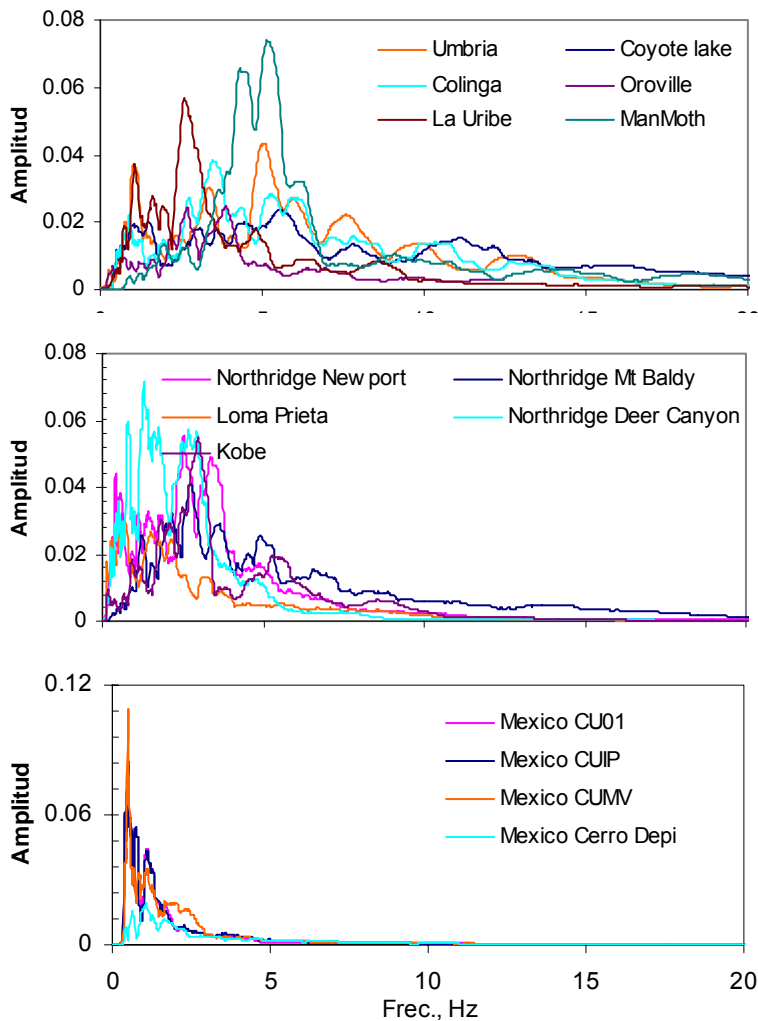


Figura 19. Contenido de frecuencia de los eventos sísmicos por sismofuente

En la Figura 20 se presentan los espectros de respuesta de un sistema de un grado de libertad ante las aceleraciones de los eventos sísmicos propuestos considerando un amortiguamiento estructural del 5%. Esta simple representación permite establecer rápidamente la amplificación máxima de un sistema de un grado de libertad sometido a esta señal. De tal manera, puede observarse que para la sismofuente *Local* se alcanzan aceleraciones espectrales de 0.4 g entre periodos que oscilan entre 0.2 y 0.5 s. La sismofuente *Intermedia* presenta aceleraciones espectrales de 0.35 g entre 0.2 a 0.6 s. Por último, en la sismofuente *Lejana* se alcanza la aceleración más baja (0.12 g). De esta última destaca que: i) aparecen dos picos importantes; el primero alrededor de 1 s y el

segundo a 2 s y ii) estos picos son más anchos que los de los eventos sísmicos de las otras sismofuentes.

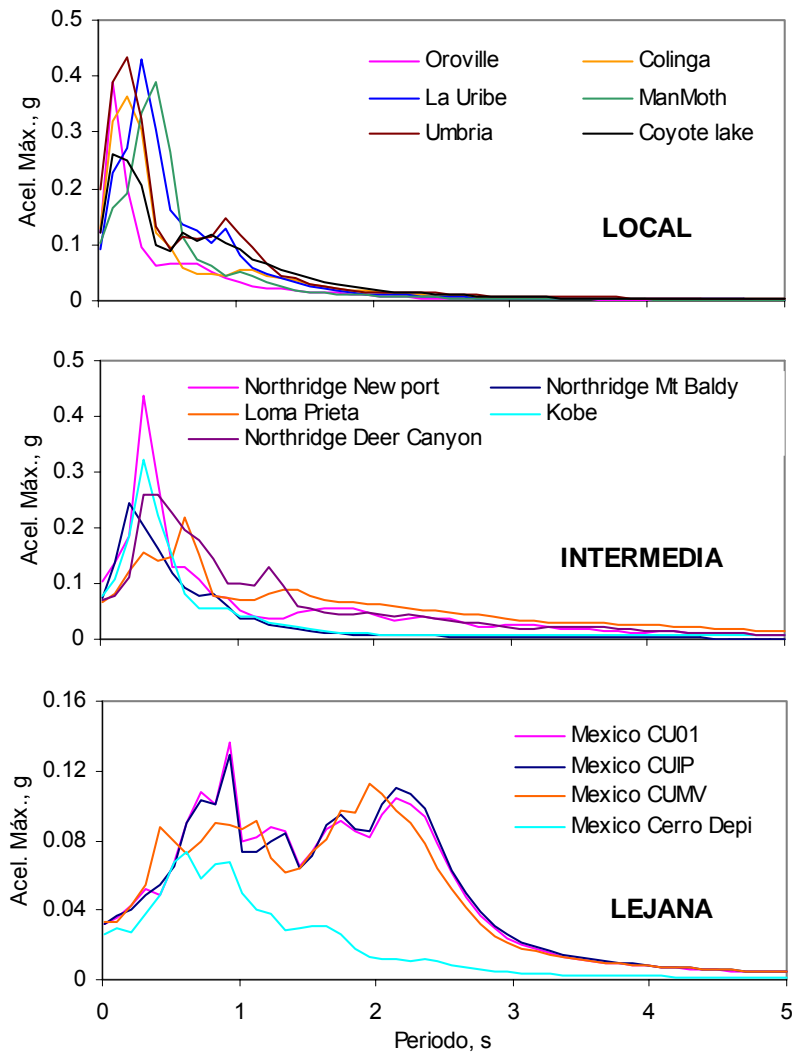


Figura 20. Espectro de respuesta de aceleraciones (5% amortiguamiento) de eventos sísmicos por sismofuente sin escalar

Como se indicó en el numeral 3.1.3 del presente informe, se reitera que siguiendo las directrices de la DPAE para la realización de los estudios de amplificación del presente trabajo, los acelerogramas descritos para las fuentes lejana, regional y local y caracterizados en las figuras 19 y 20 anteriores, fueron escalados en amplitud para considerar valores máximos de 0.038 g (lejana), 0.20 g (regional) y 0.25 g (local), respectivamente.

6. MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SUELO

El modelo del comportamiento del suelo se hizo teniendo en cuenta la variabilidad estadística de sus propiedades. De tal manera, se generaron 30 secuencias por cada perfil, de acuerdo con la distribución estadística de las propiedades en cada uno. Este proceso se realizó de la siguiente manera:

- 1) Se mantienen fijos los espesores de los materiales.
- 2) Se calcula la velocidad de propagación de ondas de corte para cada material dentro de una banda definida por la velocidad media esperada y la desviación estándar, a partir de la generación de números aleatorios entre $V_s - \sigma_{VS}$ y $V_s + \sigma_{VS}$, donde σ_{VS} es la desviación estándar.
- 3) Se selecciona de manera aleatoria una familia de curvas, a partir de la banda de variación definida para cada material por el conjunto de tres curvas de $G/G_{Máx}$ y β presentado anteriormente.
- 4) De cada grupo de sismos representativos de cada sismofuente se selecciona de manera aleatoria un sismo.
- 5) Se somete cada secuencia generada de perfiles de suelo al sismo seleccionado y se calcula en cada caso el espectro de respuesta de aceleraciones de un sistema de un grado de libertad con un amortiguamiento del 5 %. Del conjunto obtenido de espectros se calcula la media y la desviación estándar de la aceleración espectral para cada periodo de vibración. Esta actividad se repite para cada una de las tres probables sismofuentes, local, intermedia y lejana, para los registros escalados en amplitud con aceleraciones de 0.25 g, 0.20 g y 0.038 g, respectivamente.
- 6) Por último se calcula la media de los espectros de respuesta de todas las secuencias para cada perfil y se grafican los espectro de respuesta equivalente al de la media y al de la media más una desviación estándar, que sirven como base para la definición del espectro de diseño.

7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con base en la modelación descrita se obtuvieron los espectros de respuesta para las aceleraciones máximas de sistemas de un sólo grado de libertad para todas las señales y para todas las secuencias en cada uno de todos los sitios para cada zona.

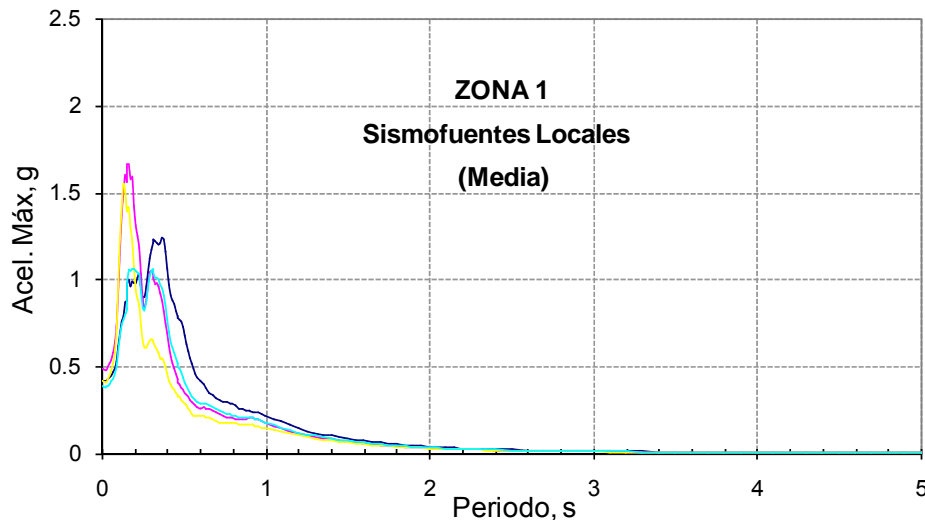
A partir de estos resultados se calculó la media y la desviación estándar de los espectros de las respuestas de todos los sitios en cada zona, para cada una de las fuentes local, intermedia y lejana y se graficaron todos los espectros suavizados, es decir, los correspondientes a la media y a la media más una desviación estándar de las respuestas de todos los sitios para cada zona, incluyendo las zonas de transición.

En el Anexo Digital se incluyen todos los espectros individuales obtenidos, así como las medias y las medias más una desviación estándar. A continuación se presenta y analiza una síntesis de las medias de los resultados obtenidos en función de los espectros suavizados, así como de las medias mas una desviación estándar, para cada zona y para cada grupo de señales.

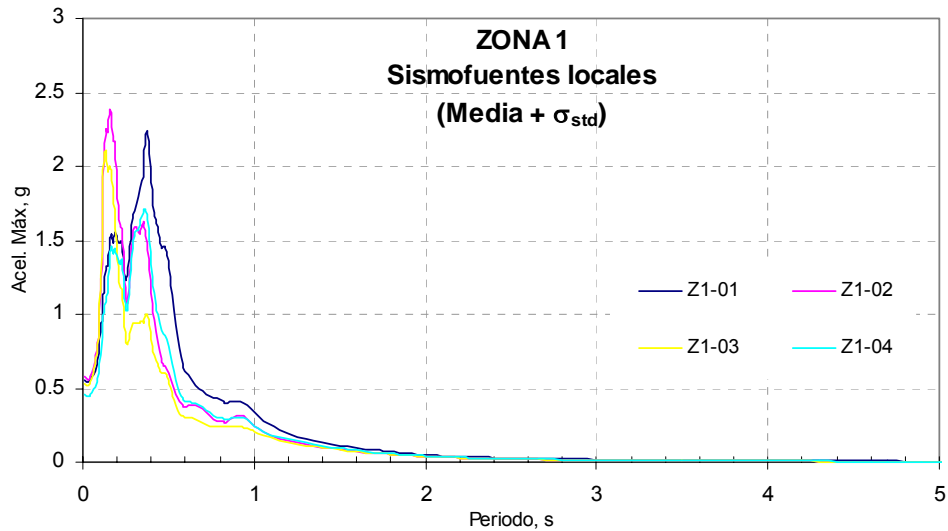
7.1. Zona 1.

7.1.1 Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.

En la Figura 21 se presentan la media y la media más una desviación estándar de los espectros de respuesta de aceleración para la zona 1, obtenidos para eventos de sismofuentes locales.



a) Media de las respuestas.



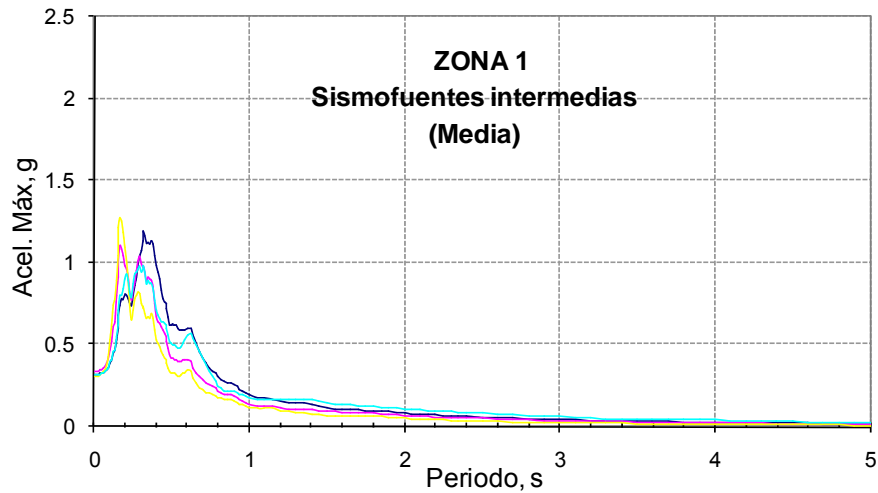
b) Media más una desviación estándar de las respuestas.

Figura 21. Espectro de respuesta de aceleraciones (5% amortiguamiento) para sismofuentes locales en la Zona 1.

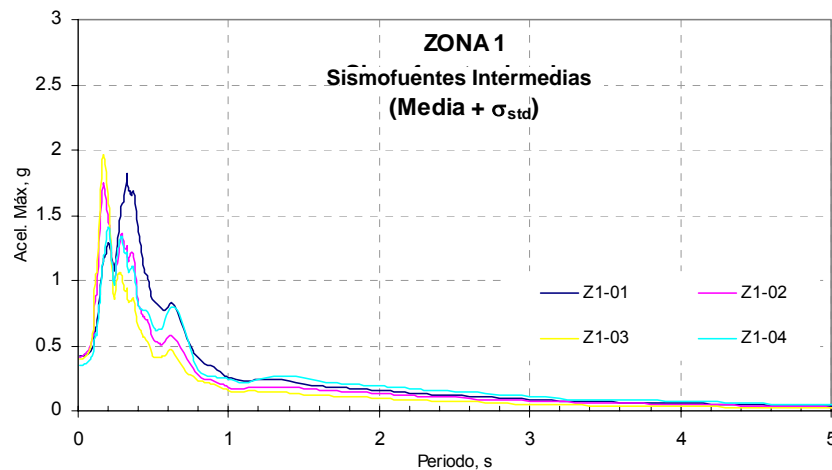
En estas figuras puede observarse que el contenido frecuencial predominante de la respuesta calculada corresponde a sistemas rígidos, es decir, con periodos cortos, entre 0.2s y 0.5 s, con amplificaciones de la señal correspondientes a intensidades entre 1.3 g y 1.65 g para la media de las respuestas y entre 1.5 g y 2.5 g, para la media más una desviación estándar.

7.1.2 Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.

En la Figura 22 se presentan la media y la media más una desviación estándar de los espectros de respuesta de aceleración para la zona 1, obtenidos para eventos de sismofuentes intermedias.



a) Media de las respuestas.



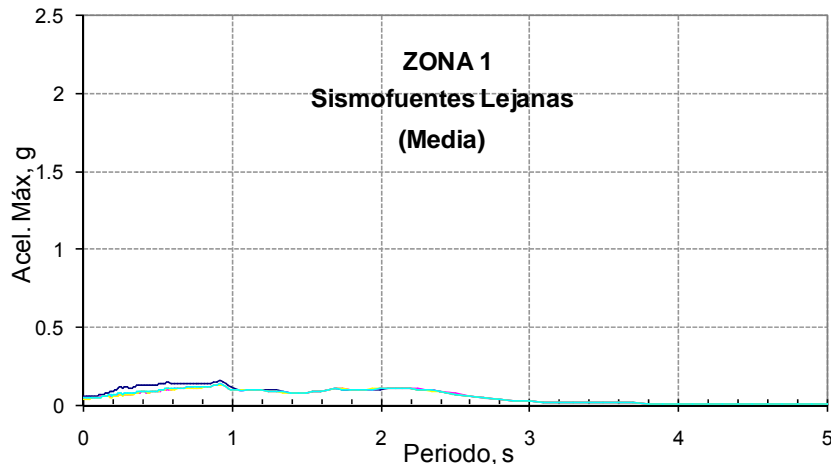
b) Media más una desviación estándar de las respuestas.

Figura 22. Espectro de respuesta de aceleraciones (5% amortiguamiento) para sismofuentes intermedias en la Zona 1.

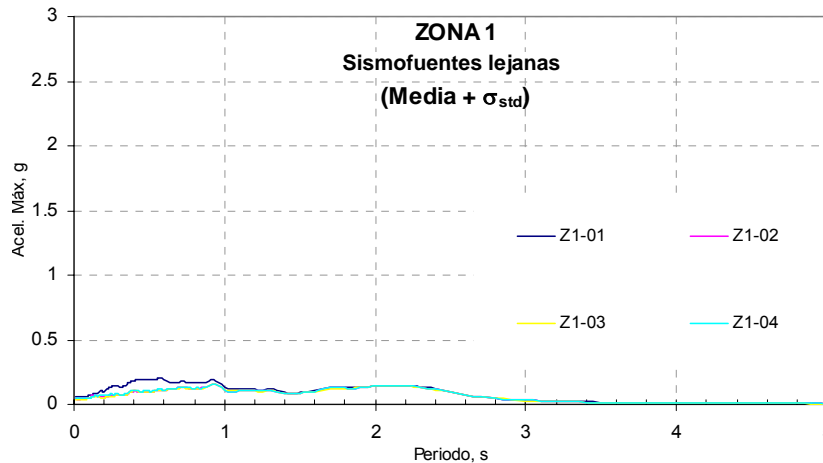
Allí puede observarse que el contenido frecuencial predominante de la respuesta calculada corresponde a sistemas rígidos, es decir, con periodos cortos, entre 0.2s y 0.6 s, intervalo ligeramente mayor que para las fuentes locales. Las amplificaciones de la señal corresponden a intensidades entre 0.6 g y 1.3 g, para la media de las respuestas y entre 0.5 g y 2.0 g para la media más una desviación estándar.

7.1.3 Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.

En la Figura 23 se presentan la media y la media más una desviación estándar de los espectros de respuesta de aceleración para la zona 1, obtenidos para eventos de sismofuentes lejanas.



a) Media de las respuestas.



b) Media más una desviación estándar de las respuestas.

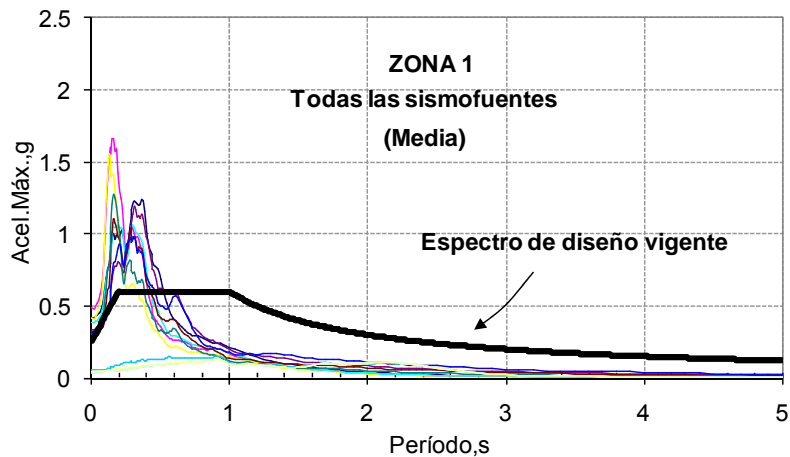
Figura 23. Espectro de respuesta de aceleraciones (5% amortiguamiento) para sismofuentes lejanas en la Zona 1.

Allí se observa que el contenido frecuencial de la respuesta calculada está en un intervalo entre 0.2 s y 2.4 s, intervalo mayor que para las fuentes locales e intermedias. Las amplificaciones de la señal corresponden a intensidades

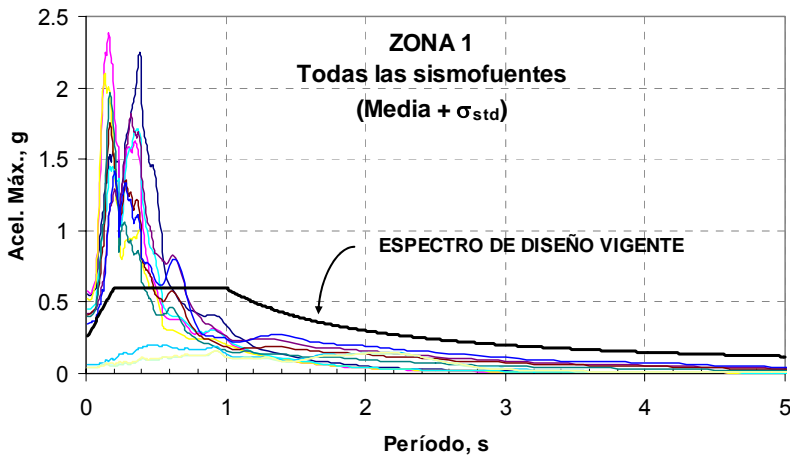
menores de 0.13 g para la media de las respuestas y menores de 0.2 g para la media más una desviación estándar.

7.1.4 Respuesta total

En la Figura 24 se muestran las medias (es decir sin tener en cuenta la incertidumbre en efecto del suelo) y las medias más una desviación estándar, de los espectros de respuesta de las aceleraciones máximas obtenidos para los perfiles representativos de esta zona, sometidos a sismos de todas las sismofuentes probables.



a) Media de las respuestas

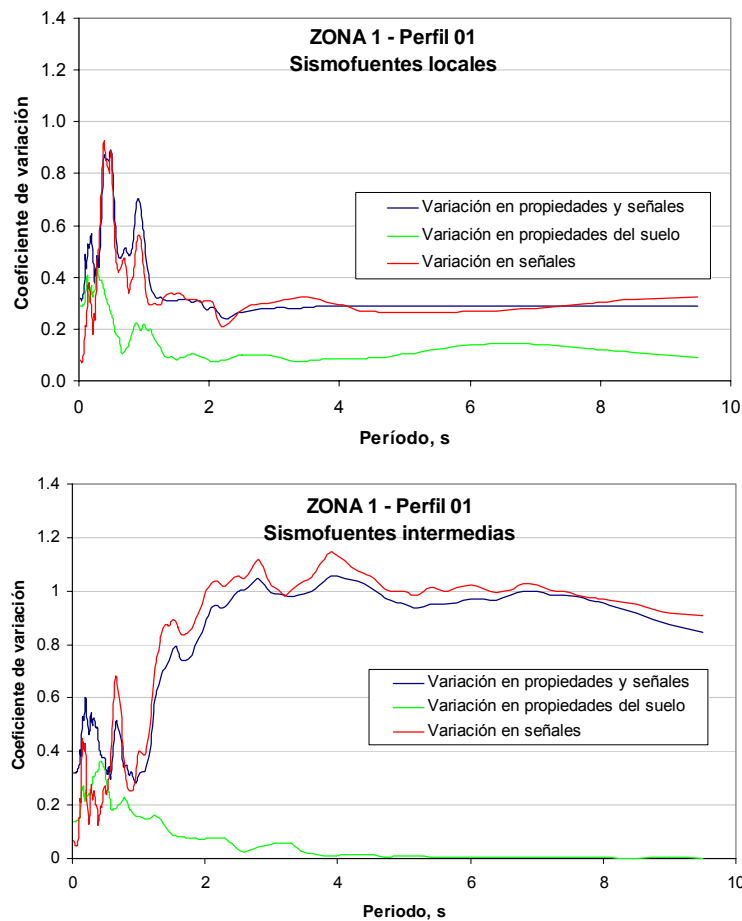


b) Media más una desviación estándar de las respuestas

Figura 24. Espectros de respuesta de aceleraciones (5% amortiguamiento) para todas las sismofuentes en la Zona 1, comparados con el espectro de diseño vigente.

Se observa que la meseta del espectro de diseño vigente cubre un intervalo de períodos mayor que el intervalo de períodos predominantes en el cálculo de la respuesta de este trabajo. Así mismo, las intensidades calculadas para períodos cortos son mucho mayores (cerca de 150 %) que las intensidades máximas del espectro de diseño.

Con el objeto de identificar el origen de esta importante diferencia en el resultado de la amplificación de la respuesta sísmica se graficaron, para algunos perfiles representativos, los coeficiente de variación de las respuestas bajo tres escenarios: i) considerando tanto la variación en los parámetros del suelo, como la selección arbitraria de las señales, es decir, la modelación presentada en el numeral anterior; ii) considerando solamente la selección arbitraria de las señales para un conjunto determinado y fijo de propiedades del perfil analizado; y iii) considerando la variación de las propiedades del suelo, para una señal única. El resultado de este análisis se presenta en la Figura 25.



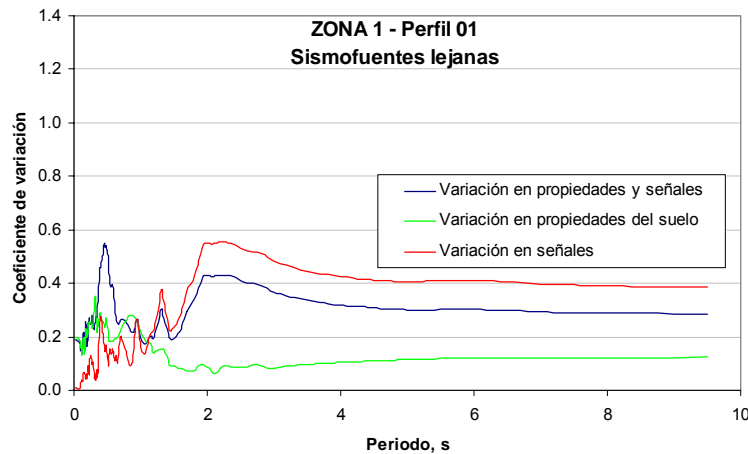


Figura 25. Coeficiente de variación por sismofuente para sitio de la Zona 1.

Se observa que el coeficiente de variación asociado a la incertidumbre de las propiedades dinámicas de los suelos es mucho menor que el asociado con la variación en las características de las señales. Es esta dispersión la que controla entonces la dispersión en las respuestas que, a su vez, es la que da como resultado en las amplificaciones que superan ampliamente el espectro de diseño vigente.

Para intervalos de períodos menores que 1 s, la variación en las señales de sismofuentes locales controlan el coeficiente de variación, que llega a ser del orden de 0.8. Debe anotarse que para estos intervalos y esa sismofuente, las intensidades de la señal son altas, del orden de 1 g.

Para períodos mayores que 1 s, la variación está controlada por la las señales de las fuentes intermedias, donde la desviación estándar es del mismo orden que la media de las respuestas.

Como se ve más adelante, en las otras zonas se presenta un comportamiento similar.

7.2. Zona 2.

A continuación se presentan los espectros de respuesta para cada una de las sismofuentes utilizadas. Se comprueba que el comportamiento exhibido en esta zona es similar a la de la Zona 1, variando principalmente la magnitud de las amplificaciones y en menor medida, el intervalo de períodos predominantes para cada caso, que para las fuentes locales e intermedias alcanzaron a llegar hasta 0.6 s (ver Figura 26, Figura 27 y Figura 28), donde cada curva corresponde al análisis de un sitio.

7.2.1 Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.

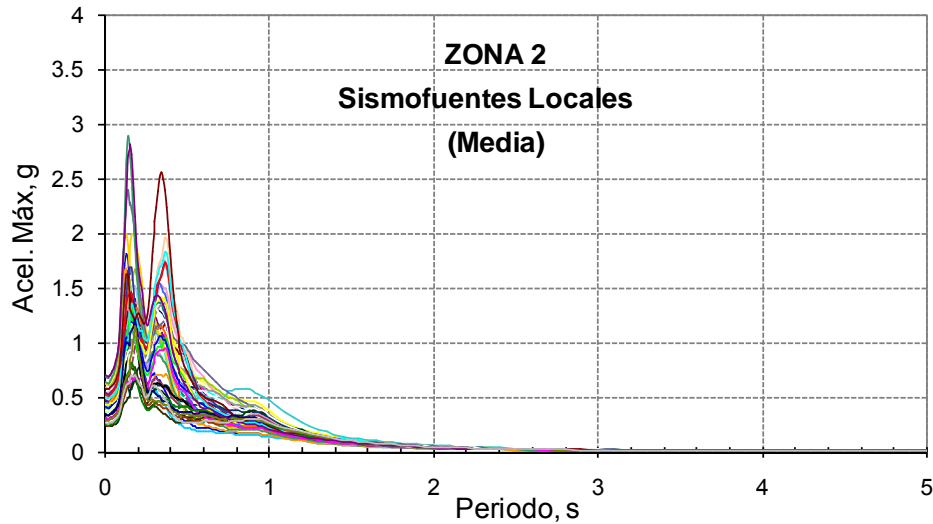


Figura 26. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes locales en la Zona 2.

7.2.2 Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.

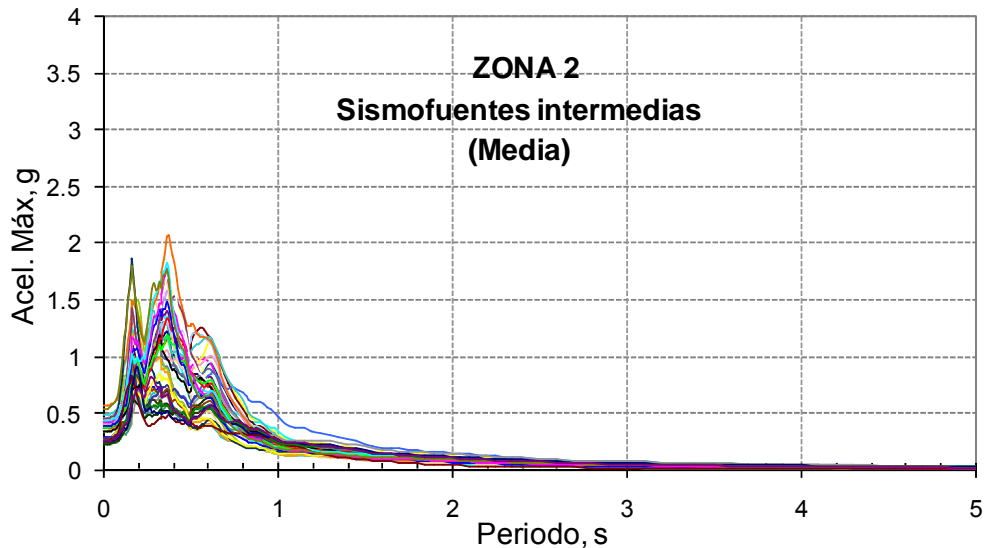


Figura 27. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes intermedias en la Zona 2.

7.2.3 Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.

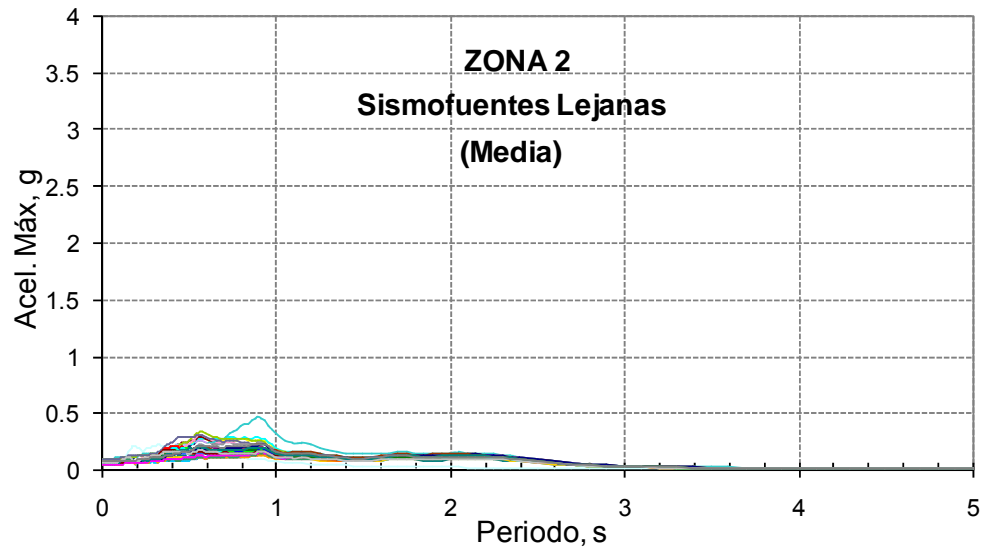


Figura 28. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes lejanas en la Zona 2.

7.2.4 Respuesta total.

En la Figura 29 se muestran las medias (es decir sin tener en cuenta la incertidumbre en efecto del suelo) y las medias más una desviación estándar, de los espectros de respuesta de las aceleraciones máximas obtenidos para los perfiles representativos de esta zona, sometidos a sismos de todas las sismofuentes probables.

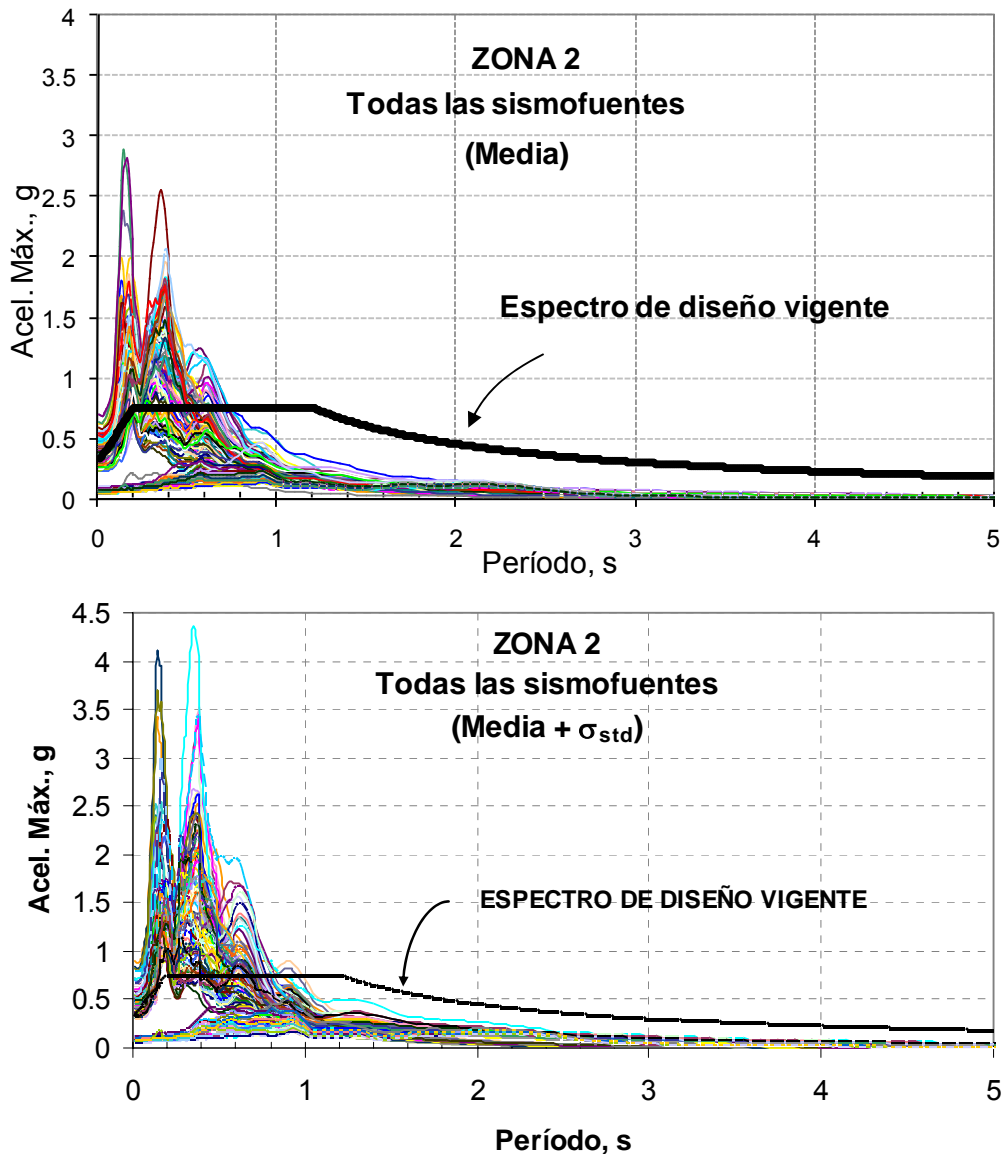


Figura 29. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para todas las sismofuentes en la Zona 2, comparados con el espectro de diseño vigente.

Como se advierte antes, en esta zona también se presentan amplificaciones mucho mayores que las esperadas con base en el espectro de diseño vigente, cuya causa, así mismo, se debe a la variación en las características de las señales y no a la de los parámetros de los suelos. Igualmente la plataforma del espectro de diseño vigente cubre un intervalo de períodos mayor que el requerido por las respuestas obtenidas.

7.3. Zona 3.

A continuación se presentan los espectros de respuesta en la Zona 3 para cada una de las sismofuentes utilizadas. Como puede comprobarse de las diferentes figuras, el comportamiento exhibido en esta zona es similar a la de las dos zonas anteriores, aunque no alcanzan valores de amplificación tan fuertes como para la Zona 2. Vale la pena resaltar que, para las fuentes intermedias, para períodos largos, mayores que 1 s, el espectro tiene un descenso poco significativo, con una función tipo lineal, mientras que para las fuentes lejanas se produce un pico adicional alrededor de un período de 2 s alcanzando aceleraciones espectrales de hasta 0.4g. (ver Figura 30, Figura 31 y Figura 32).

7.3.1 Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.

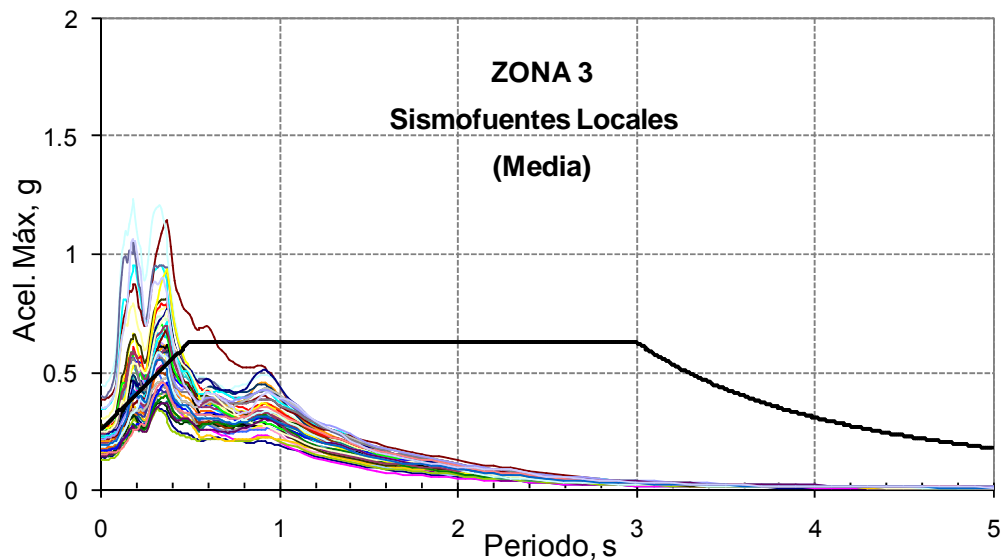


Figura 30. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes locales en la Zona 3.

7.3.2 Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.

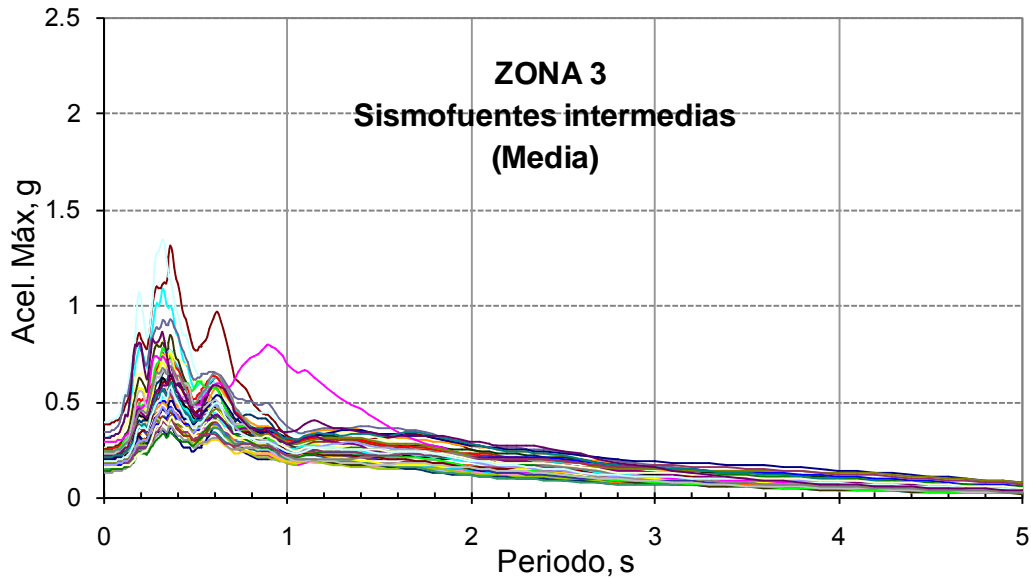


Figura 31. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes Intermedias en la Zona 3.

7.3.3 Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.

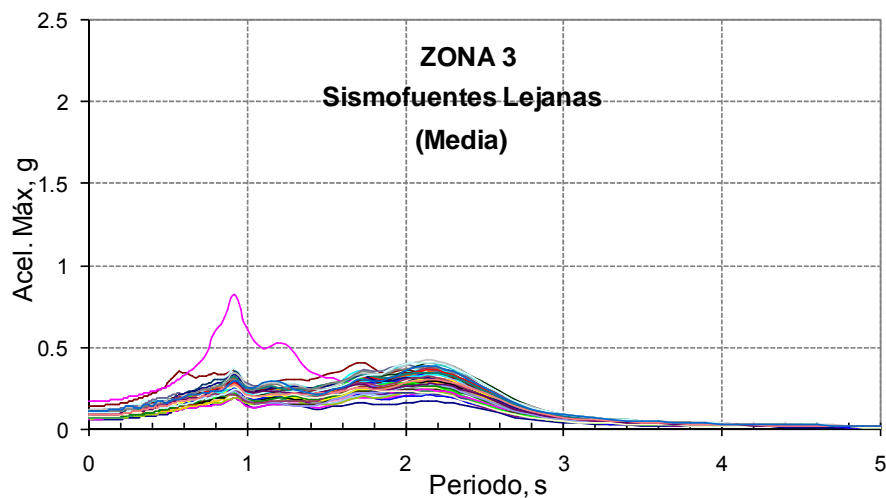


Figura 32. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes lejanas en la Zona 3.

7.3.4 Respuesta total.

En la Figura 33 se presentan los espectros de respuesta ante todas las sismofuentes en la Zona 3, comparados con el espectro de diseño vigente para esa zona.

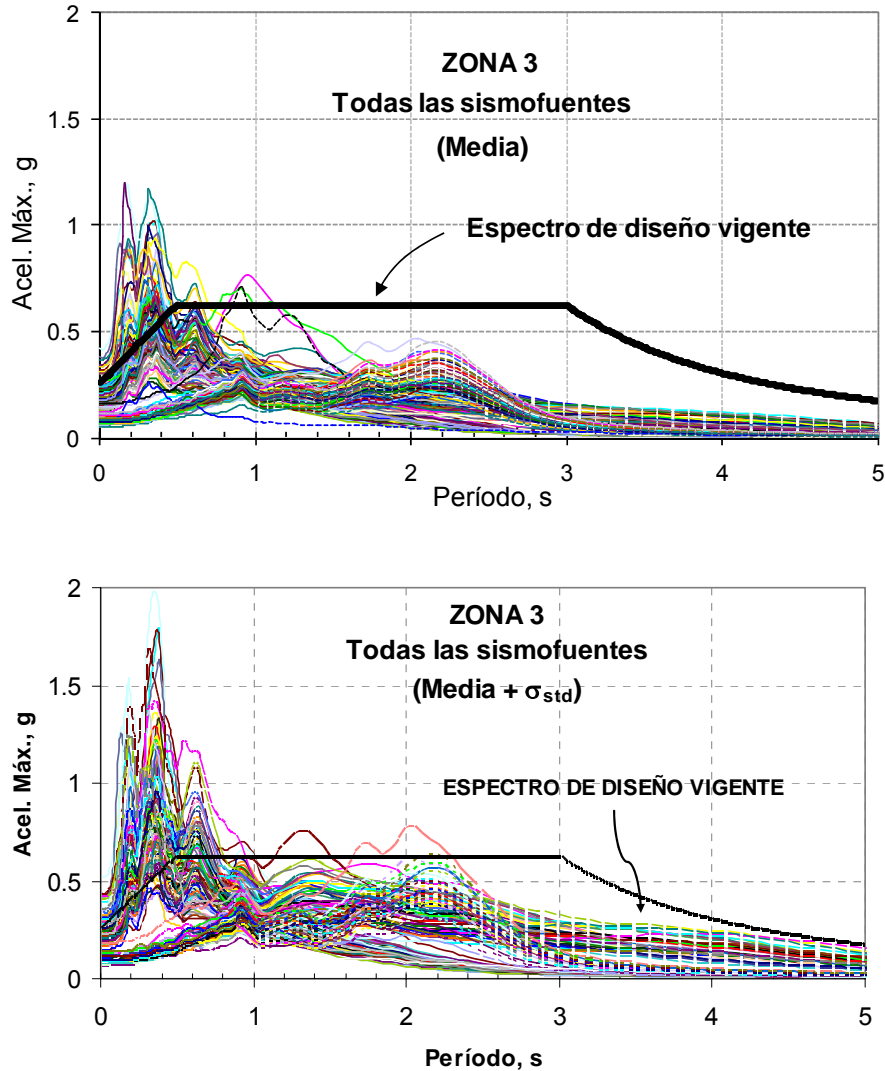


Figura 33. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para todas las sismofuentes en la Zona 3, comparados con el espectro de diseño vigente.

Como se advierte antes, en esta zona también se presentan amplificaciones mucho mayores que las esperadas con base en el espectro de diseño vigente,

cuya causa, así mismo, se debe a la variación en las características de las señales y no a la de los parámetros de los suelos.

7.4. Zona 4.

A continuación se presentan los espectros de respuesta para cada una de las sismofuentes utilizadas. Vale la pena resaltar que, para las fuentes intermedias, se presentan aceleraciones espectrales de hasta 0.35g para períodos alrededor de 1.5 s, mientras que para las fuentes lejanas se produce un pico adicional alrededor de un período de 2 s alcanzando aceleraciones espectrales de hasta 0.5g. (Ver Figura 34, Figura 35 y Figura 36).

7.4.1 Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.

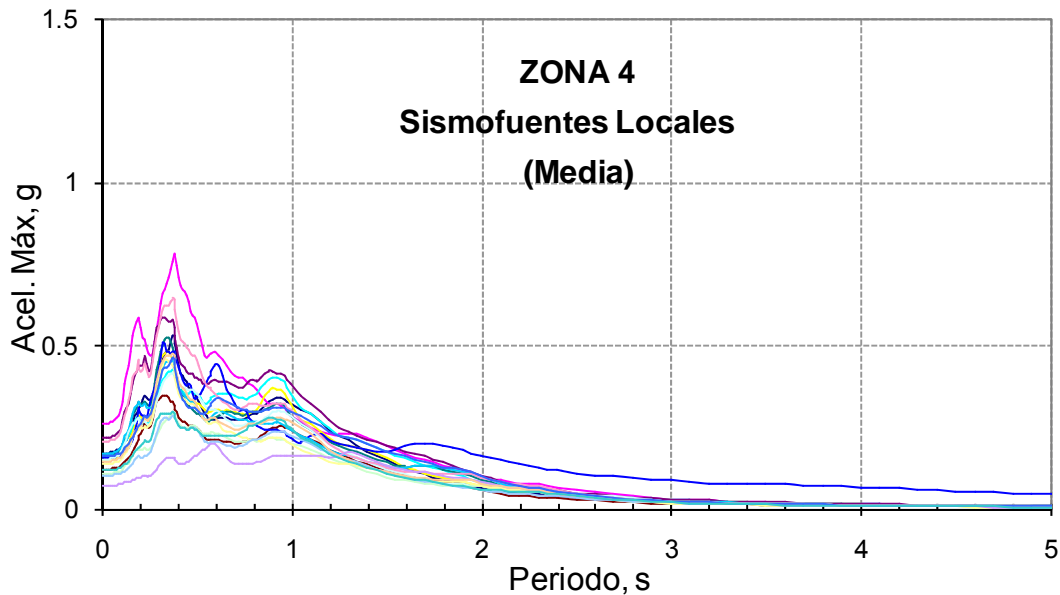


Figura 34. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes locales en la zona 4.

7.4.2 Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.

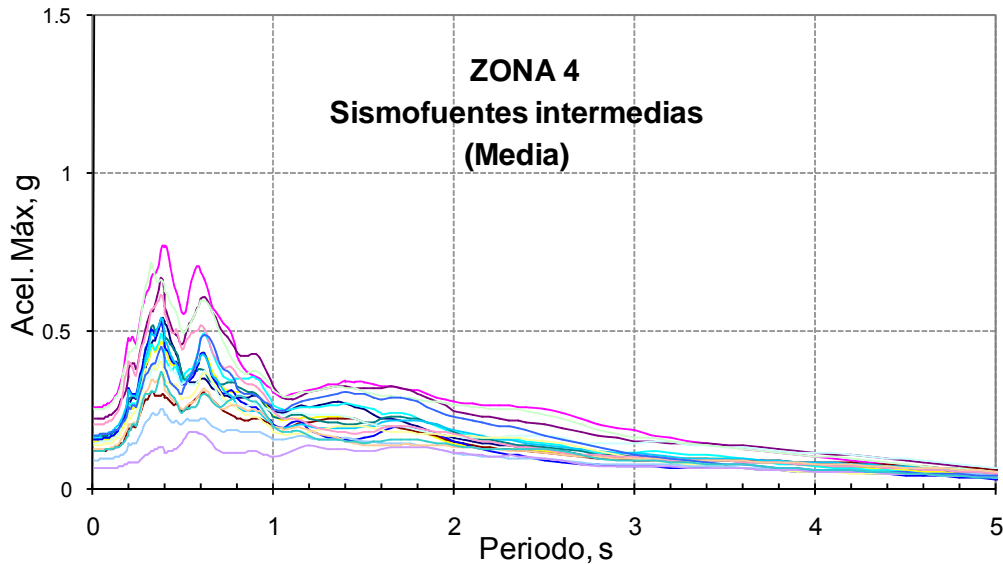


Figura 35. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes intermedias en la zona 4.

7.4.3 Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.

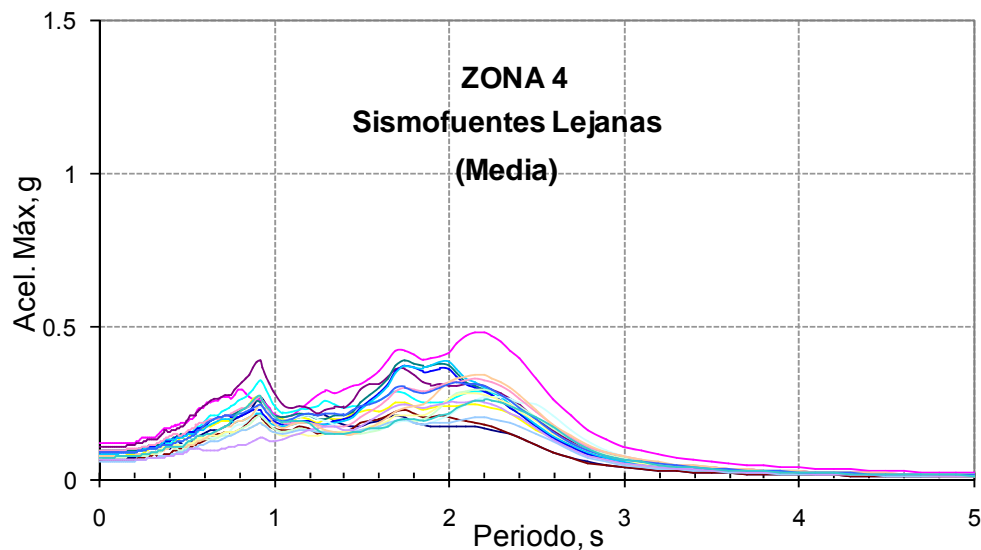


Figura 36. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes lejanas en la zona 4.

7.4.4 Respuesta total.

En la Figura 37 se presentan los espectros de respuesta ante todas las sismofuentes en la Zona 4, comparados con el espectro de diseño vigente para esa zona.

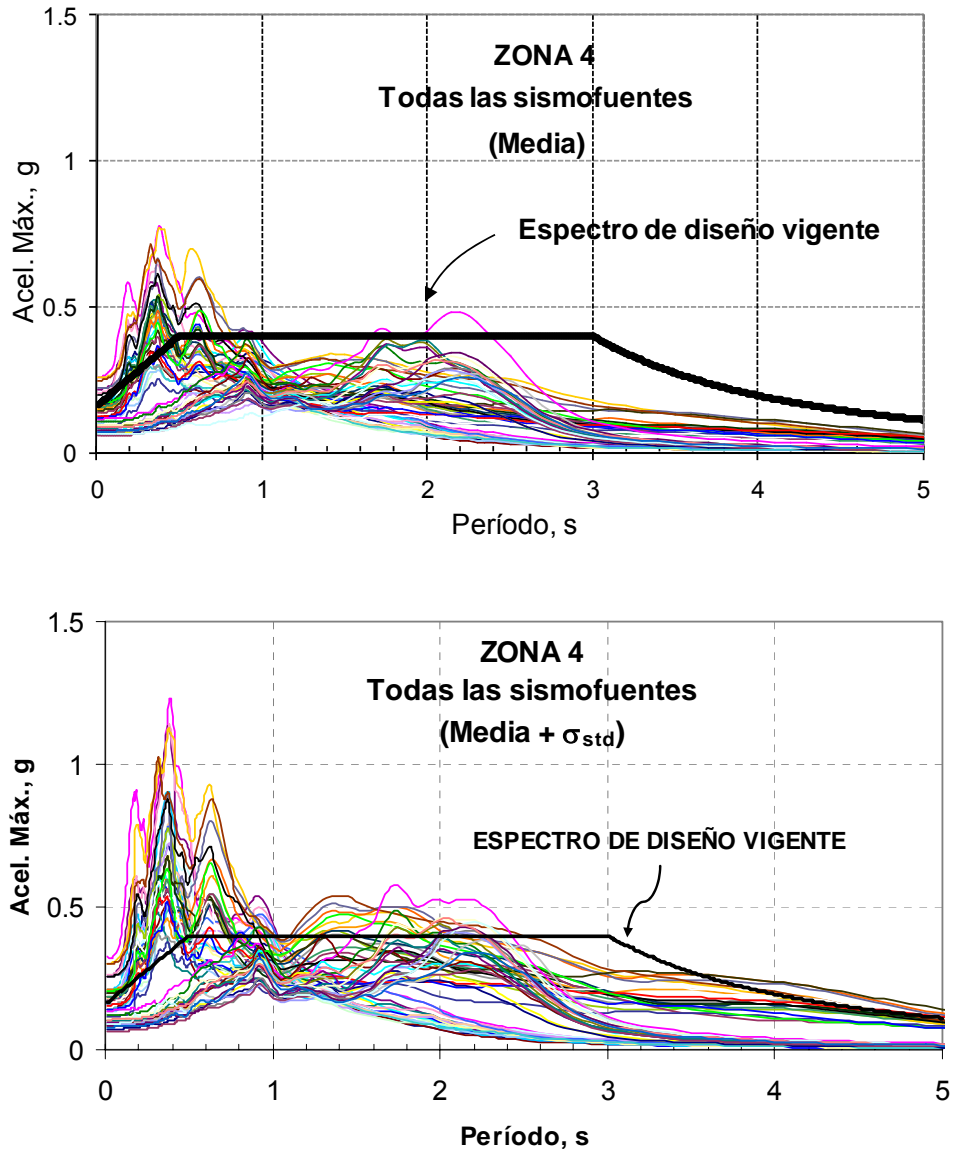


Figura 37. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para todas las sismofuentes en la Zona 4, comparados con el espectro de diseño vigente.

Como se advierte antes, en esta zona también se presentan amplificaciones mucho mayores que las esperadas con base en el espectro de diseño vigente, cuya causa, así mismo, se debe a la variación en las características de las señales y no a la de los parámetros de los suelos.

7.5. Zona 5.

A continuación se presentan los espectros de respuesta para cada una de las sismofuentes utilizadas. Para las fuentes intermedias, para períodos largos, mayores que 1 s, el espectro tiene un descenso poco significativo, permaneciendo casi constante, efecto que se repite para las fuentes lejanas en todo el intervalo de períodos. (Ver Figura 38, Figura 39 y Figura 40).

7.5.1 Respuesta a los eventos de sismofuentes locales.

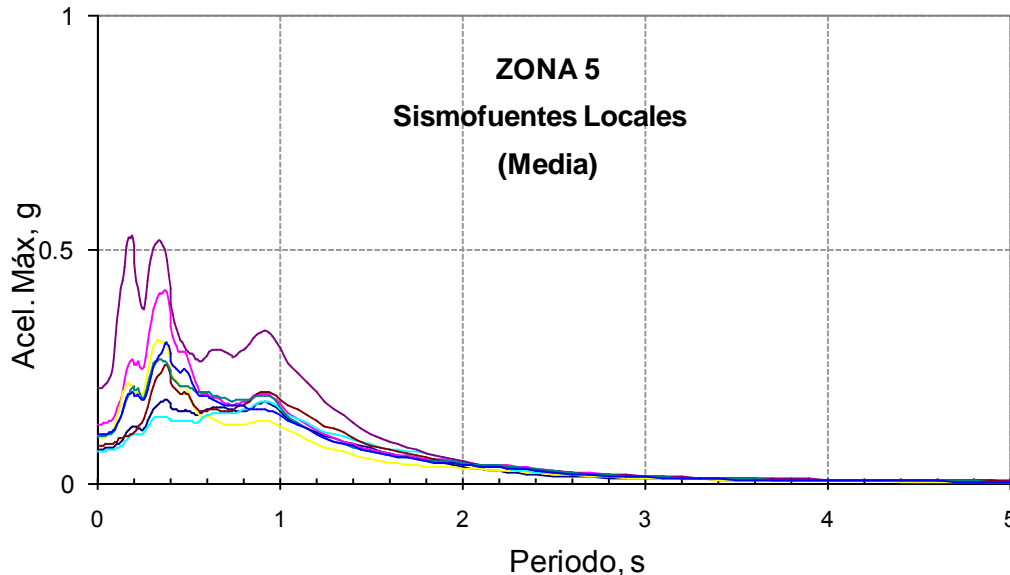


Figura 38. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes locales en la zona 5.

7.5.2 Respuesta a los eventos de sismofuentes intermedias.

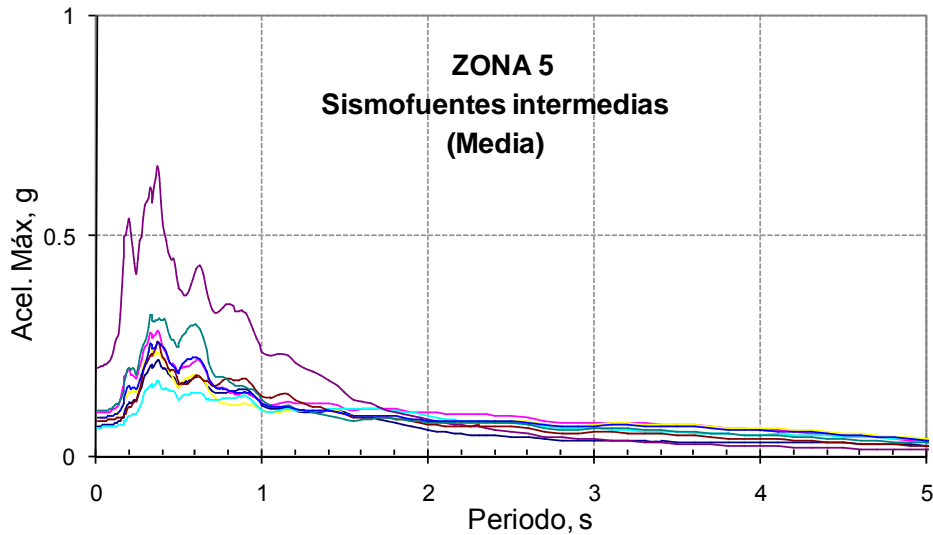


Figura 39. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes intermedias en la zona 5.

7.5.3 Respuesta a los eventos de sismofuentes lejanas.

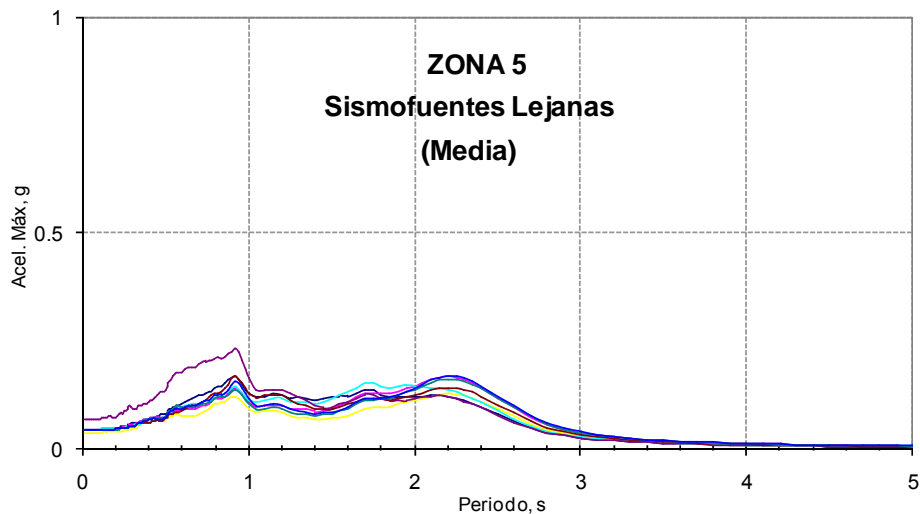


Figura 40. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para sismofuentes lejanas en la zona 5.

7.5.4 Respuesta total.

En la Figura 41 se presenta la media de los espectros de respuesta ante todas las sismofuentes en la Zona 5, comparada con el espectro de diseño vigente para esa zona.

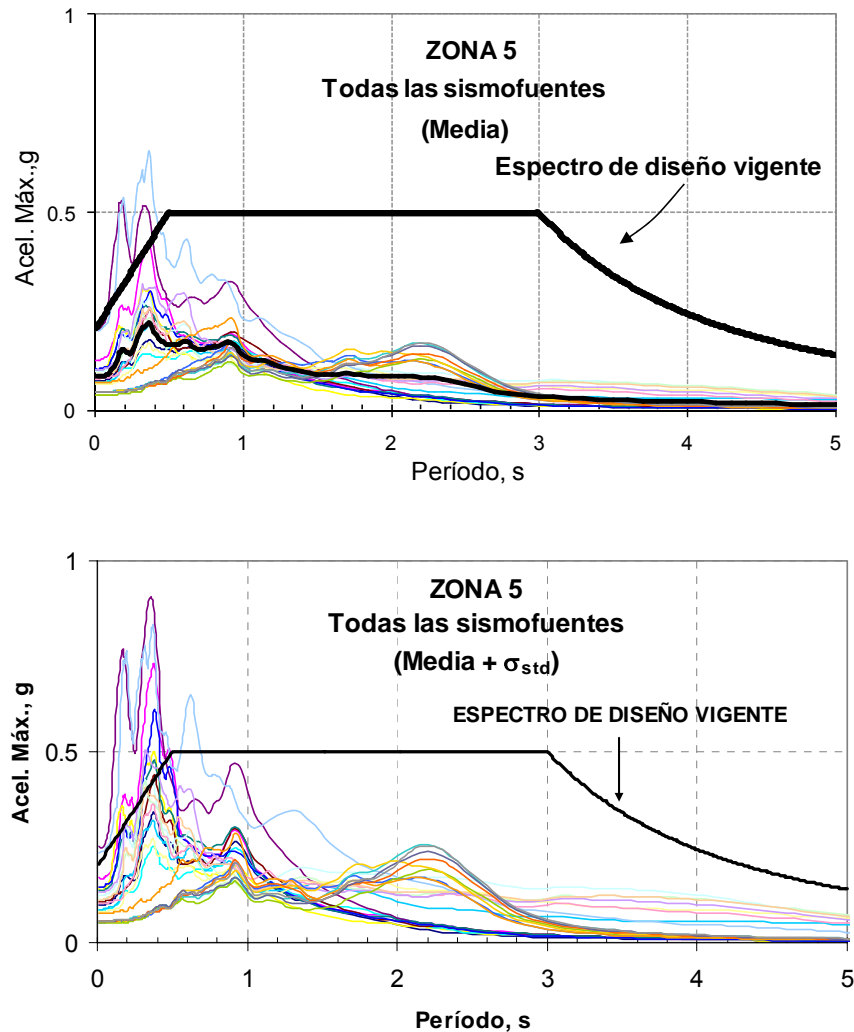


Figura 41. Espectros de respuesta de aceleración (5% amortiguamiento) para todas las sismofuentes en la Zona 5, comparados con el espectro de diseño vigente.

Como se advierte antes, en esta zona también se presentan amplificaciones mucho mayores que las esperadas con base en el espectro de diseño vigente,



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

cuya causa, así mismo, se debe a la variación en las características de las señales y no a la de los parámetros de los suelos.

En el Anexo A del presente informe se incluyen las respuestas obtenidas para cada una de las Zonas consideradas en el análisis destacando las propiedades de los sitios con los que se obtuvieron las respuestas máximas y mínimas así como la profundidad a la que se encuentra la roca.

8. ESPECTROS DE DISEÑO

En el capítulo anterior se presentaron, para cada grupo de sismofuentes, las **medias** de los espectros de respuesta de aceleraciones obtenidos para las 30 corridas del SHAKE en **cada punto de cada zona**. De tomar estos espectros para proponer los espectros de diseño, no se estaría tomando en cuenta un margen para involucrar la incertidumbre en los parámetros del suelo respecto a los básicos considerados para **cada sitio**, y la variabilidad de los suelos en la zona se concretaría a tener involucrados varios sitios para la zona dada. La incertidumbre en la fuente sísmica y en la atenuación de la onda, desde su origen hasta el basamento rocoso en el sitio, se considera involucrada con el escalamiento requerido por la DPAE de las señales sísmicas utilizadas, sin ser explícitamente clara la probabilidad asociada a las fuentes local y lejana (con aceleraciones de 0.25g y 0.038g respectivamente). En estos resultados se tendría involucrada la incertidumbre en el sismo y solo la media en la variabilidad de las propiedades del suelo en un sitio dado.

En otra consideración para determinar los espectros de diseño, se evalúa la situación en la que se **incluye** la incertidumbre en la respuesta de amplificación al involucrar en cada sitio **variabilidad en las propiedades del suelo**. Una práctica aceptada en la literatura sobre el tema es la de introducir esta incertidumbre considerando la media de la respuesta, más una desviación estándar. En este caso las respuestas tendrían involucradas tanto la incertidumbre en el sismo como la variabilidad de las propiedades del suelo en un sitio dado al usar para este caso la desviación descrita. Sin embargo, existe aún una discusión acerca de si este valor resulta excesivo al involucrar **simultáneamente** las condiciones críticas de los sismo y de los suelos, lo que implica considerar una probabilidad que podría ser extrema para el estudio en consideración. En este orden de ideas la respuesta así obtenida sería excesiva. Sin embargo, tampoco es sensato ignorar completamente la incertidumbre asociada el efecto del suelo, especialmente a la luz de la naturaleza de los suelos de la Sabana de Bogotá y de la cantidad y lo incompleto de la información geotécnica disponible.

Así, de forma rigurosa, sería necesario aplicar el teorema de las probabilidades totales para el cálculo de los espectros en superficie, sopesando



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

probabilísticamente la desviación asociada a los sismos con la de los suelos, ejercicio que en el gran conjunto de análisis del presente problema no es realizable en términos prácticos. En relación con los sismos es de considerar que si se hiciera el ejercicio de calcular la relación entre espectros de respuesta en superficie en roca obtenida considerando incertidumbre nula en la ecuación de atenuación y compararla con la que se obtiene considerando dicha incertidumbre, y luego comparar esa diferencia con la de desviación en la ecuación de atenuación, es probable que no diera precisamente una desviación estándar para el sismo.

Los sismos provenientes de fuentes intermedias están escalados a un valor de aceleración máxima en roca de 0.20 g, basados en los resultados del Estudio de Amenaza Sísmica Nacional realizado en 1994, en el que para el caso de la Amenaza para Bogotá en el nivel del 0,20g prácticamente toda la probabilidad es aportada por la falla frontal de la cordillera oriental. Por otro lado, se tiene la percepción que está involucrada una sobreestimación de la amenaza para sismos locales al requerir el escalamiento de las señales respectivas para obtener una aceleración máxima de 0.25 g, valor que correspondería a amenazas con probabilidades de excedencia inferiores a 10 % en 50 años. En alguna medida, la consideración de aceleración de 0.038g para la fuente lejana tampoco es igualmente claro a que probabilidad corresponde. Se considera necesario que al interior de la DPAE se precise la probabilidad asociada a dichos valores requeridos para las fuentes cercana y lejana, o alternatively se establezca las aceleraciones de los sismos que para las fuentes local y lejana deban considerarse para probabilidades compatibles con los requerimientos del Código Nacional.

Considerando todo lo anterior, como una aproximación para definir los espectros de respuesta representativos para cada zona plantea el siguiente procedimiento:

- a) Descartar los picos que estén por encima del 80 % de las medias más una desviación estándar para todas las señales.
- b) Estimar la aceleración máxima correspondiente al mayor de los picos restantes de todas las señales.
- c) Cuando el valor obtenido para el valor de la meseta está controlado por las señales locales, se considera necesario reducir el valor de aceleración espectral asociado a dicha meseta. El porcentaje de reducción debe asociarse a la estimación de la aceleración máxima de la señal de los sismos locales que sea compatible con la normativa, es decir, que represente una probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años que, para Bogotá, la que en la medida que esté entre 0.15 g y 0.2 g, implica una reducción que lleve el valor de la meseta



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

al menos al 80% del valor anteriormente anotado (resultado de haber considerado 0.25g para esta fuente). Con ello se evita tener en algunos casos en valores de hasta más de 2g, intensidades aparentemente excesivas cuando se comparan con valores usuales en la literatura especializada en el tema, en ambientes sísmicos similares.

- d) El ancho de la meseta se debe considerar de tal forma que cubra razonablemente la dispersión de las señales en la intensidad seleccionada. Cabe anotar que en la determinación de hasta que período se mantiene la meseta horizontal debe igualmente considerarse el efecto sobre el desplazamiento espectral aplicable para las estructuras, ya que en muchos casos una consideración excesiva hacia períodos largos resulta en contradicciones con la naturaleza del fenómeno sísmico, puesto que el desplazamiento, calculado como la pseudo-aceleración espectral (tomada del espectro propuesto) dividida por el cuadrado de la frecuencia angular correspondiente, para aceleraciones espectrales constantes crece indefinidamente de forma parabólica con el aumento del período, distorsionando el comportamiento real de las estructuras con períodos largos, cuyos desplazamientos máximos se deben acercar al desplazamiento del suelo. Esta situación que debe arreglarse no es un problema exclusivo de los espectros vigentes actualmente para Bogotá, sino que es un problema generalizado de la mayoría de los espectros de diseño vigentes hoy en el mundo asociados con el actual método aceptado de diseño, basado en fuerzas y no en desplazamientos.
- e) La disposición del ramal descendente se estableció con base en regresiones que involucran los picos de las respuestas a las señales intermedias y lejanas.
- f) Hay situaciones, como fue el caso de las zonas 3 y 4, en las que la combinación de todas las señales (locales y regionales combinadas con las lejanas) resultan en más de un intervalo de períodos correspondientes a aceleraciones máximas predominantes. En estos casos puede contemplarse considerar un espectro de diseño envolvente que involucre dos mesetas. Esta propuesta es debatible para el caso de un edificio de cierta altura, cuyo primer modo tenga un periodo que corresponda a la meseta inferior y sus modos superiores podrán tener periodos que caigan en la meseta superior, lo que implicaría que se presentaran simultáneamente aceleraciones asociadas a sismos de fuentes locales y lejanas, cosa que no es probable.

Sin embargo, en primer lugar, la mayor parte de los diseños que utilizan espectros de diseño normativos utilizan el método de la fuerza horizontal equivalente, que sólo tiene en cuenta las respuestas dinámicas debido al primer modo y, en segundo lugar, aunque es cierto que, por lo menos el

segundo modo, tiene aportes significativos a la respuesta, la NSR-98 acepta que el efecto del trabajo inelástico se tenga en cuenta por medio de la división de las fuerzas elásticas por un factor R que oscila entre 1.5 y 7, para las respuestas de todos los modos, al considerar que la respuesta del segundo modo tiene una capacidad de disipación de energía inferior a la del primer modo.

Así, mientras no se especifique un R discriminado para cada modo, no es conveniente considerar las respuestas bajas para periodos cortos distintos al fundamental.

- g) Para las zonas de transición se debe escoger entre tres alternativas:
- i. Utilizar el espectro recomendado que representa la envolvente de los espectros de las dos zonas limítrofes,
 - ii. Utilizar el espectro recomendado que representa el promedio de los espectros de las dos zonas limítrofes, o
 - iii. realizar un estudio geotécnico riguroso que permita caracterizar el perfil del suelo y determinar a cual de las zonas representa y utilizar el espectro correspondiente.

8.1. Comparación entre los resultados obtenidos del análisis y los espectros de diseño.

A continuación se presentan todos los espectros de diseño para todas las zonas (Figura 42) y los espectros individuales de cada zona y sus transiciones, sobre las respuestas de los resultados obtenidos con el modelo unidimensional (Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50 y Figura 51).

FIGURA 42 ES EL RESUMEN POR ACORDAR

Figura 42. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) propuestos para todas las zonas.

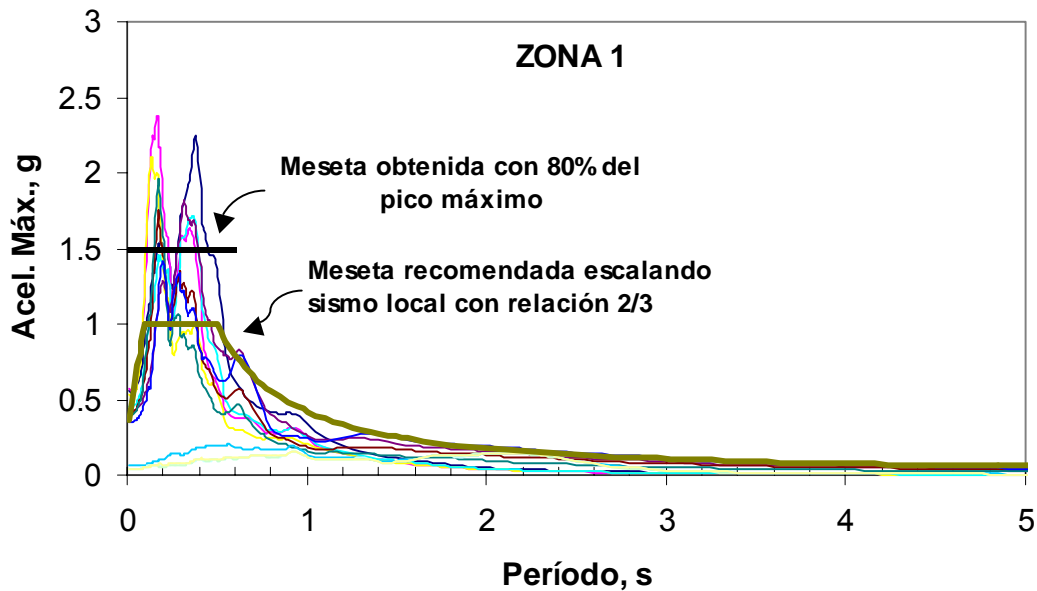


Figura 43. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Zona 1 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

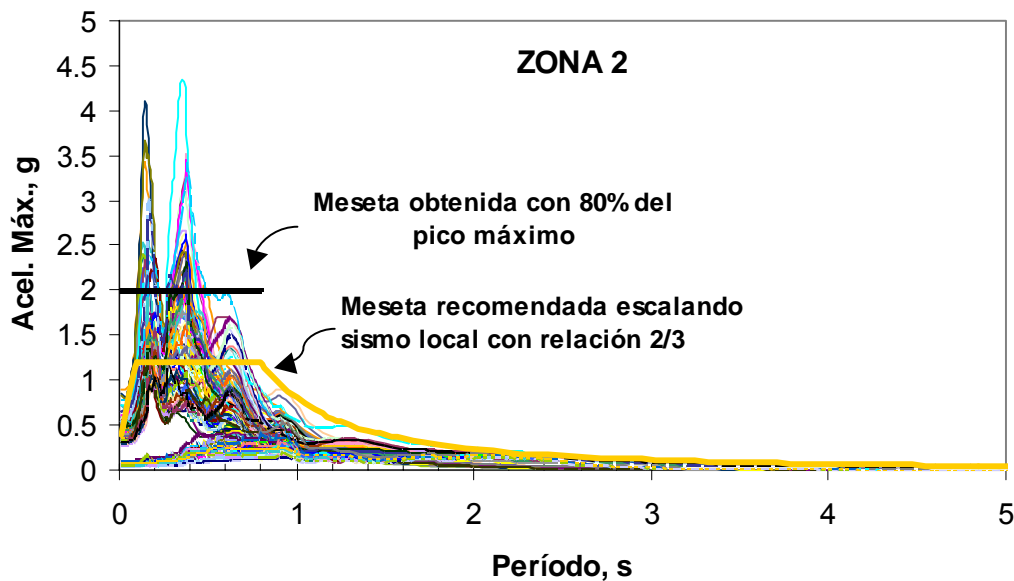


Figura 44. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Zona 2 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

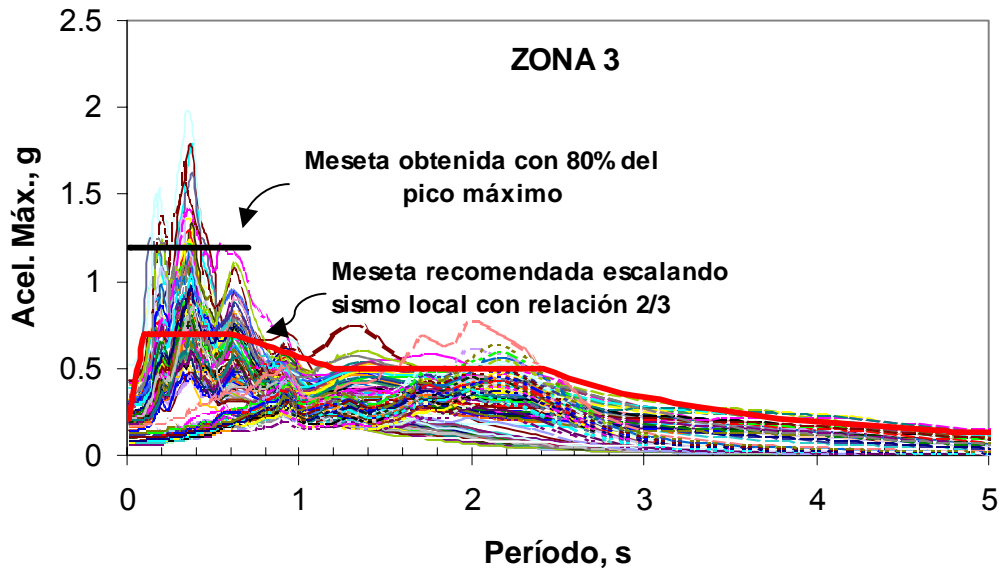


Figura 45. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Zona 3 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

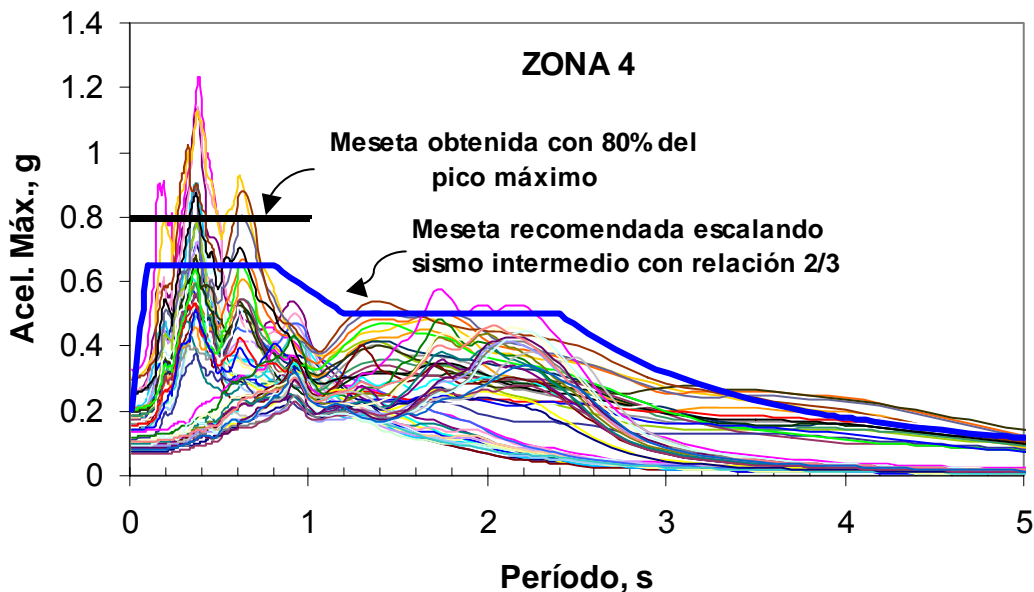


Figura 46. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Zona 4 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

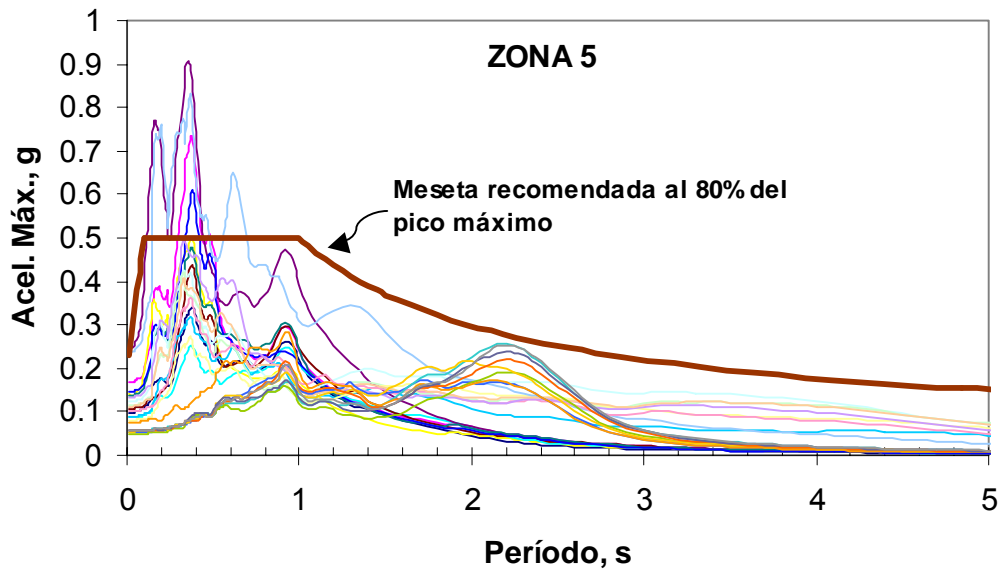


Figura 47. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Zona 5 considerando la media más desviación estándar en el comportamiento del suelo.

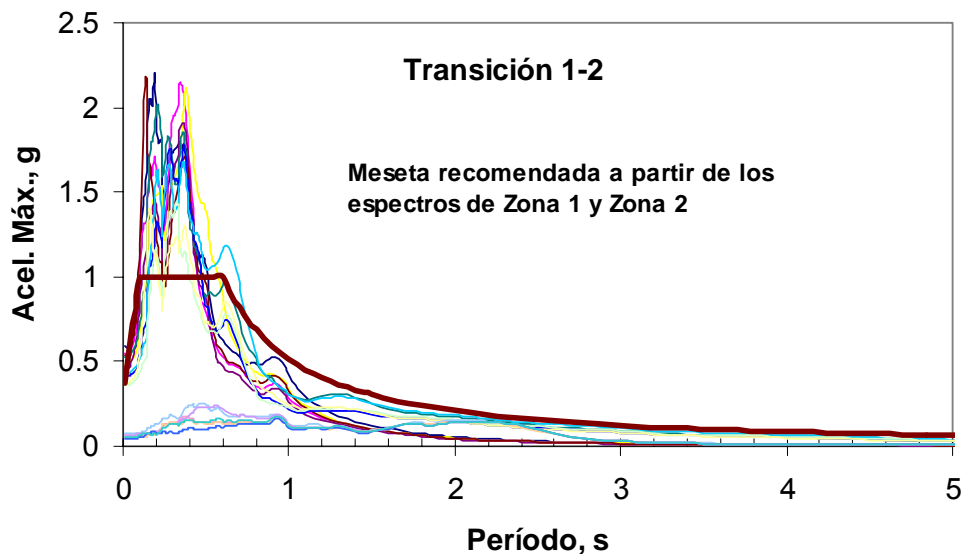


Figura 48. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Transición 1-2 considerando la media más desviación estándar en el comportamiento del suelo.

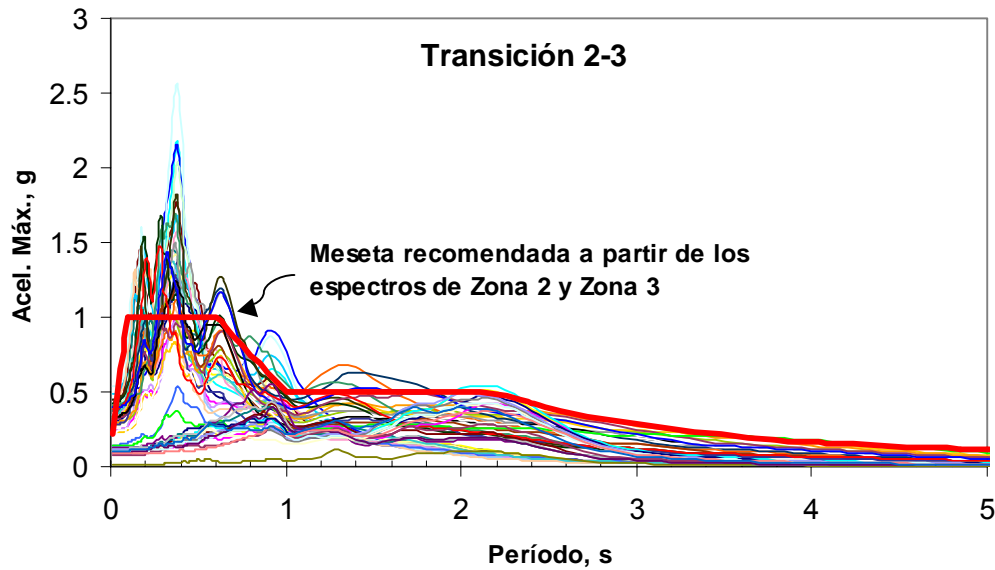


Figura 49. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Transición 2-3 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

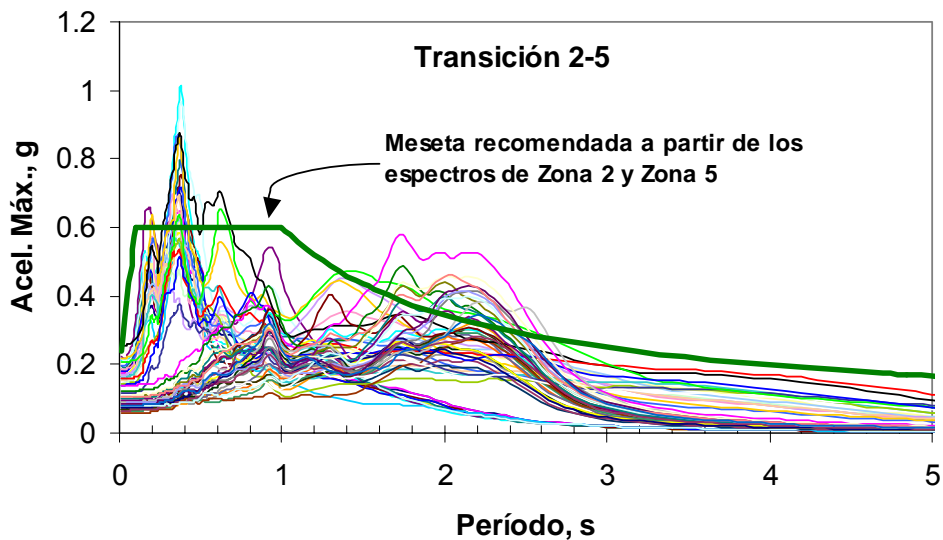


Figura 50. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Transición 2-5 considerando la media más desviación estandar en el comportamiento del suelo.

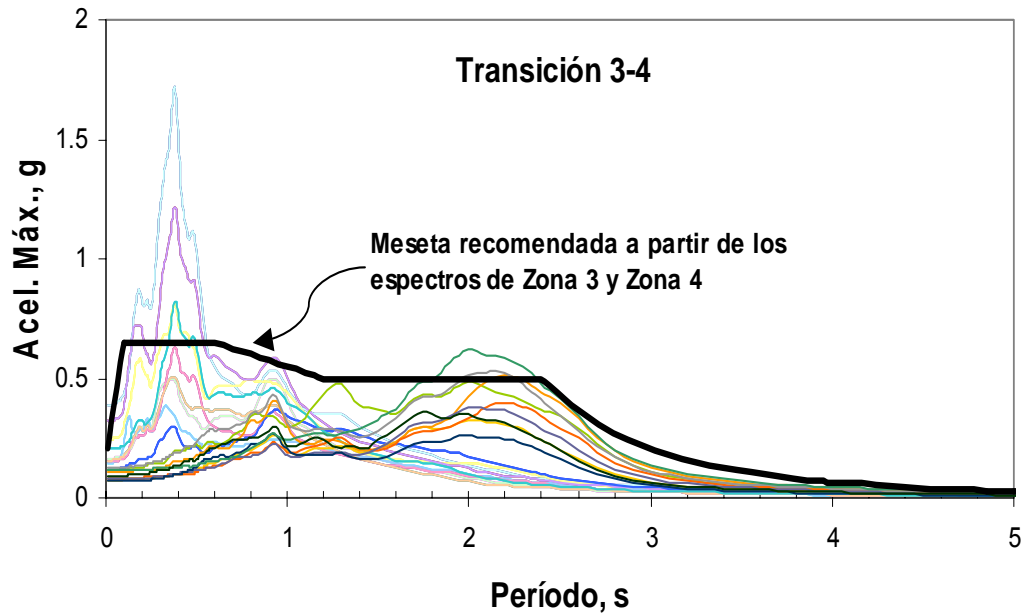


Figura 51. Espectros de diseño de aceleración (5% amortiguamiento) para la Transición 3-4 considerando la media más desviación estándar en el comportamiento del suelo.

9. CONCLUSIONES

Con base en el desarrollo del trabajo y en los resultados obtenidos pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- a) Las bases de datos de los perfiles de suelos no contienen la misma información para todos los sitios. Casi todos los sitios tienen información acerca de humedad y límites de consistencia. Sin embargo, no se incluyen datos sobre nivel freático, son escasos los sitios que incluyen información sobre peso unitario y casi el 50 % carece de información acerca de la velocidad de propagación de ondas de corte.
- b) Para el cálculo de la respuesta dinámica de cada sitio seleccionado por la DPAE se analizó la sensibilidad a la variación propia de las propiedades del suelo, a partir de una banda definida por la desviación estándar para la velocidad, para el confinamiento, y para las propiedades índice para las curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento con el nivel de deformación.



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

- c) La respuesta dinámica se calculó en cada sitio generando aleatoriamente 30 secuencias de perfiles con propiedades seleccionadas dentro de su intervalo de variación, sometidos a señales sísmicas seleccionadas aleatoriamente de cada uno de los grupos de señales suministrados para los tres escenarios, local, intermedio y lejano.
- d) Los resultados obtenidos presentan dispersiones importantes. Los análisis de sensibilidad mostraron que la dispersión está controlada principalmente por las características diversas de las señales y no por la dispersión de los parámetros de los suelos. El grupo de señales que induce mayor dispersión en los resultados es el de la sismofuentes intermedias.
- e) Las amplificaciones para períodos cortos en la mayor parte de las zonas están controladas por las respuestas de las señales del grupo de sismofuentes locales.
- f) Las señales de las sismofuentes locales no parecen ser consecuentes con tasas de excedencia del 10 % en 50 años, puesto que la señal, cuando se escala con la instrucción recibida para obtener aceleraciones máximas de 0.25 g, produce aceleraciones espectrales en roca mayores a 1g. Una situación en alguna medida similar ocurre para las señales asociadas a fuentes lejanas.
- g) Consecuentemente, la meseta para los espectros de diseño recomendados se basan en una reducción de las intensidades calculadas con base en la relación del orden de $0.17/0.25$, para los intervalos de valores controlados por las señales de fuentes cercanas.
- h) Donde la combinación con el efecto de las fuentes intermedias y lejanas lo amerita podría contemplarse espectros con más de una meseta. Si se coordina con las NSR-98 para especificar un R discriminado para cada modo, se podría, alternativamente, presentar ambas envolventes completa, la de la fuente local y la de las demás fuentes.
- i) En las zonas 3, 4 y 5, se presentan aceleraciones espectrales importantes, del orden de 0.50 g para periodos de hasta 2.4 seg, las cuales están asociadas a los sismos originados en las sismofuentes intermedias y lejana, distinguiéndose claramente el efecto de cada una de ellas.
- j) Para los espectros de las zonas con suelos comparativamente rígidos, Zona 1 y Zona 2, los espectros aquí considerados tienen una meseta más estrecha, pero con aceleraciones espectrales superiores, que el del espectro del decreto vigente.
- k) En la zona 5, de suelos con rigidez intermedia, la meseta del espectro propuesto tiene la misma intensidad del espectro vigente, pero sólo se extiende hasta 1 s, mientras que en el espectro vigente llega hasta 3 s.



ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

- l) En las zonas con suelos flexibles, zonas 3 y 4, para las que se podrían considerar espectros con dos mesetas, en la región de períodos cortos, el espectro propuesto tiene una intensidad superior que el vigente, mientras que para períodos largos, la meseta es más estrecha que la del espectro vigente, se extiende solamente hasta 2.4 s y tiene una intensidad de 0.5 g, que la hace menor que la del espectro vigente en la zona 3 (0.6 g) y mayor que el de la zona 4 (0.4 g).
- m) En los sondeos de las Zonas 1 y 2 donde hay contos rodados, en alguna medida es cuestionable la aplicabilidad del modelo SHAKE por las limitaciones como este tipo de material puede ser modelado en dicho programa. La aplicabilidad del SHAKE es indudablemente más clara en otras zonas.
- n) Los espectros aquí propuestos tienen en cuenta las incertidumbres asociadas al efecto del suelo.

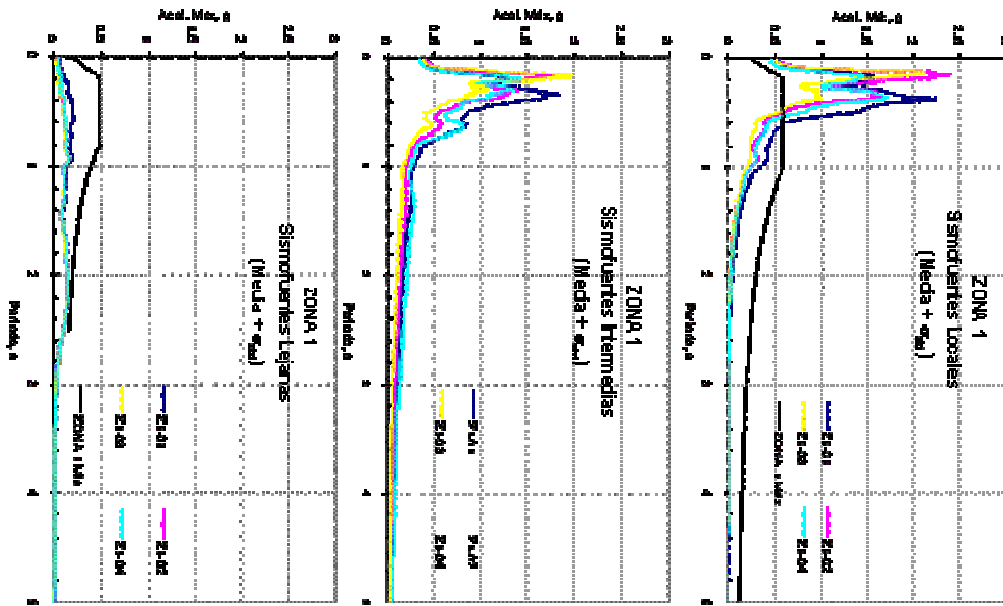
10. REFERENCIAS

- Dobre, R. and Vucetic, M. (1991). "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117(1).
- Hardin. B. O. and Black, W. (1968). "Vibrations modulus of normally consolidated clay". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 94; No. 2 pp. 353-369.
- Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993). "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay". In: *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 33 ,No. 1; pp.182-191.
- LEONG E. C., RAHARDJO H. and CHEONG H. K. (2003) Stiffness-strain relationship of Singapore residual soils. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, paper No. 160.
- Mitchell, J.K. (1993). "Fundamentals of soil behavior". Second edition, John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America. 437 p.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972). "A SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites." Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SEED H. B. and IDRIS, I. M. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. UCB/EERC-70/10, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 40 p.



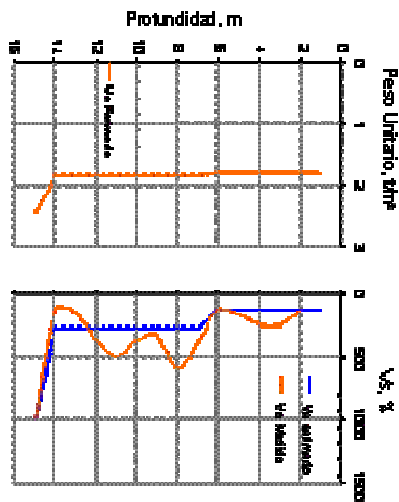
ASOCIACION COLOMBIANA
DE
INGENIERIA SISMICA

ANEXO A



Rta. Máxima

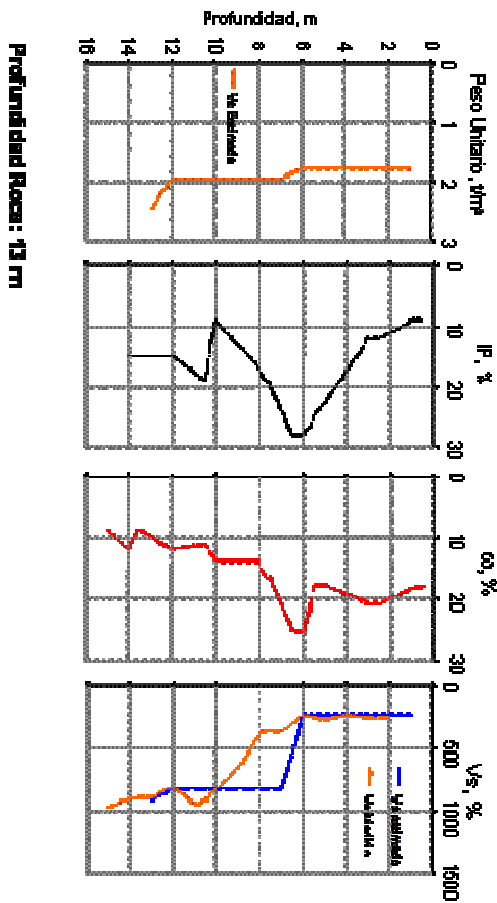
Sitio Z1-01



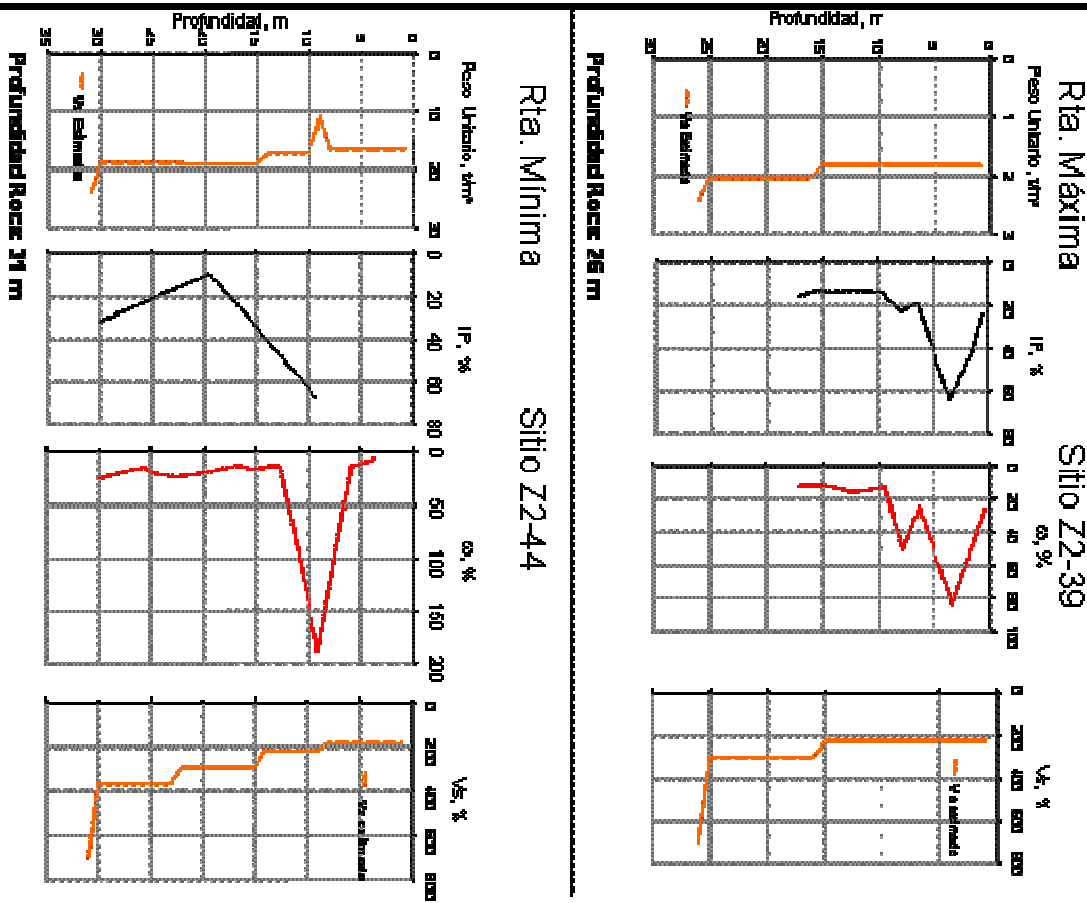
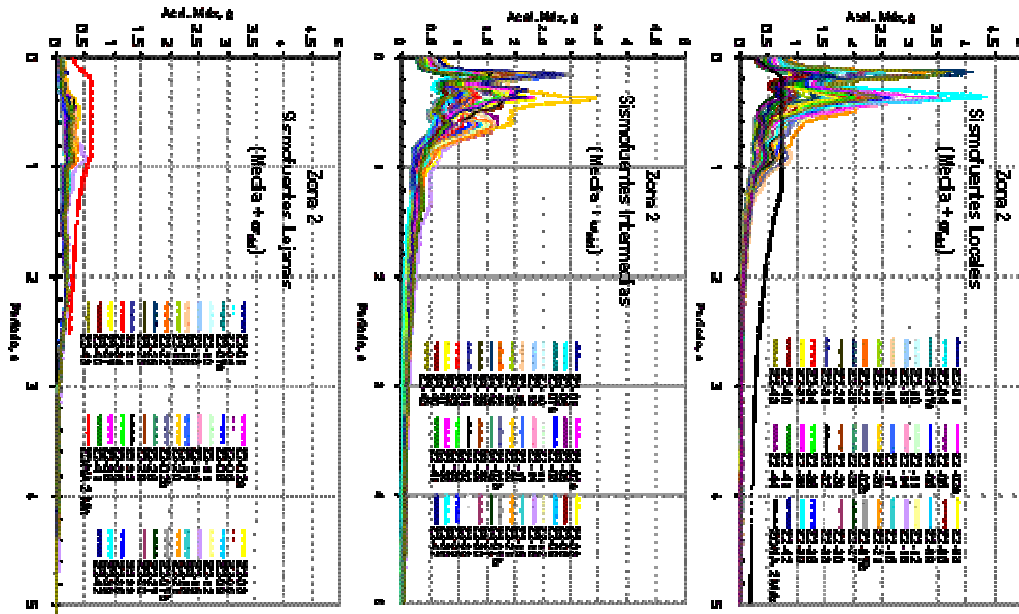
Profundidad Roca : 15 m

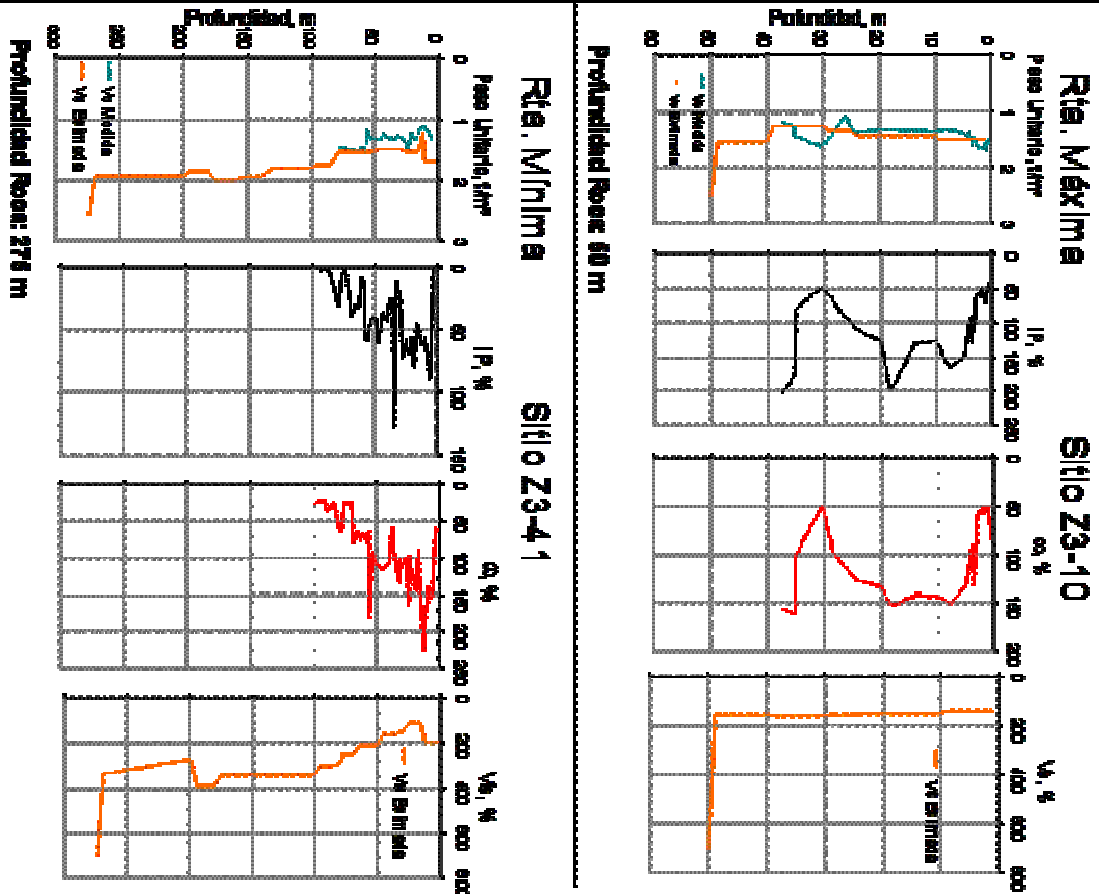
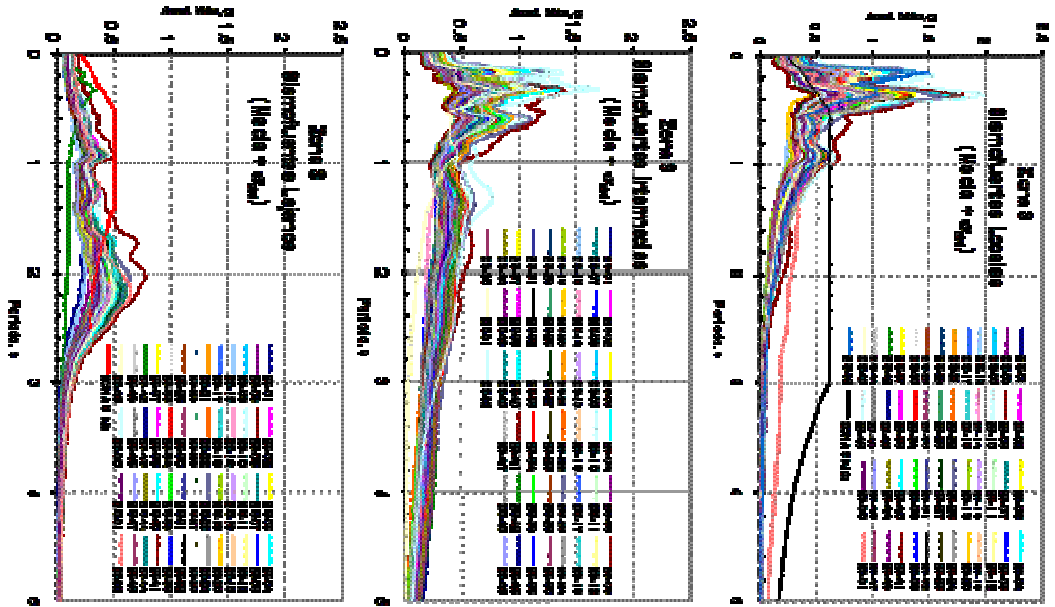
Rta. Mínima

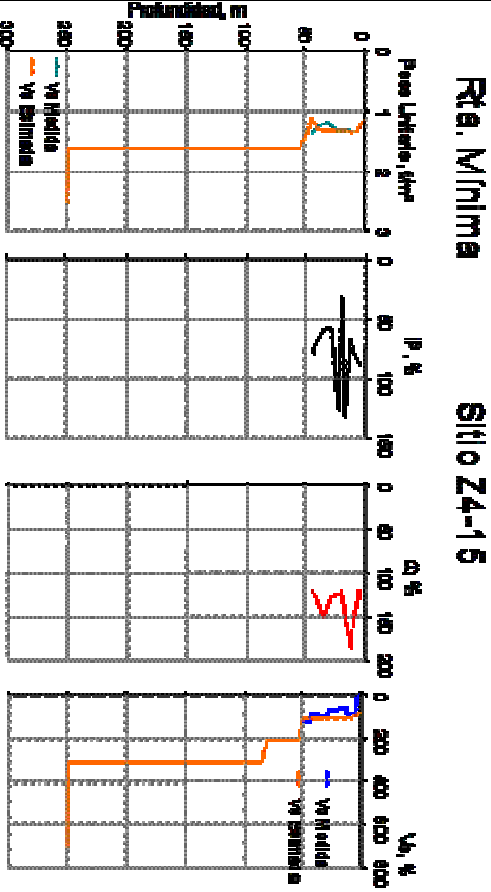
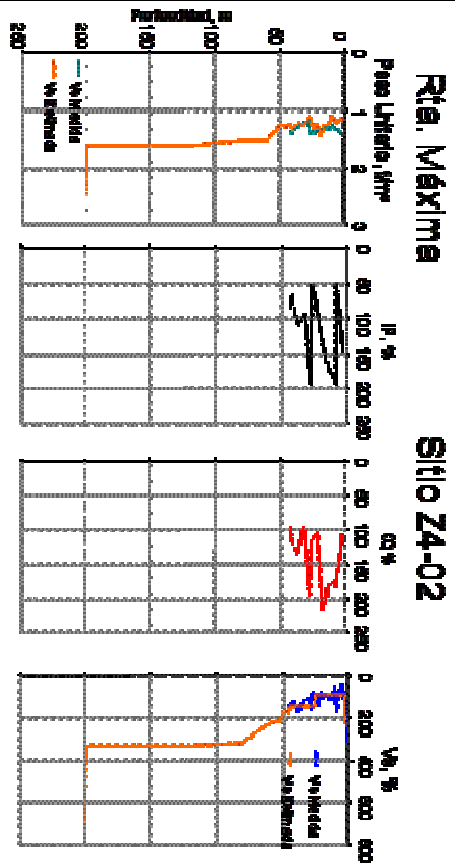
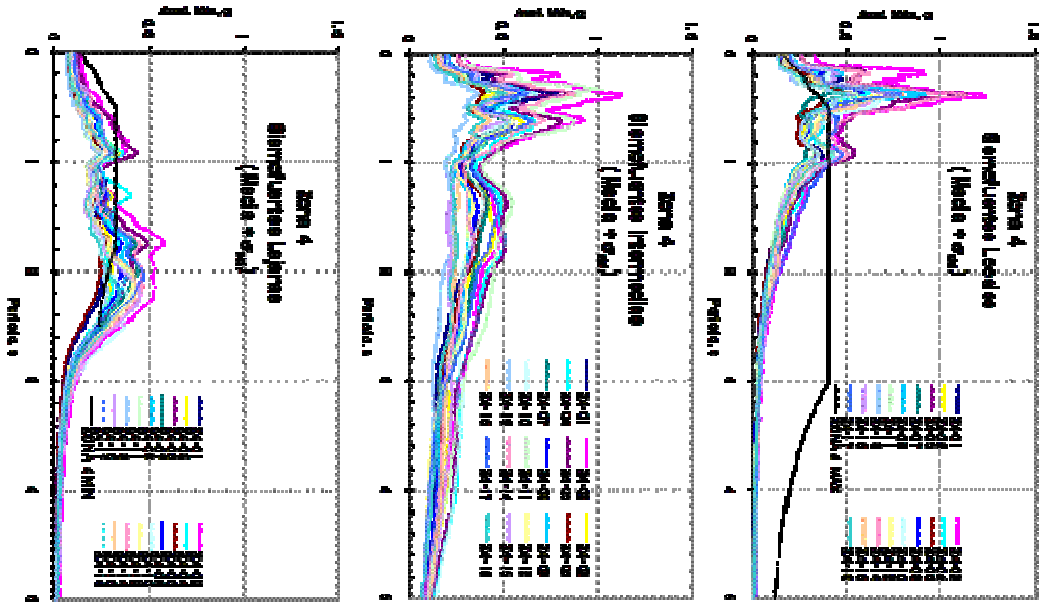
Sitio Z1-03

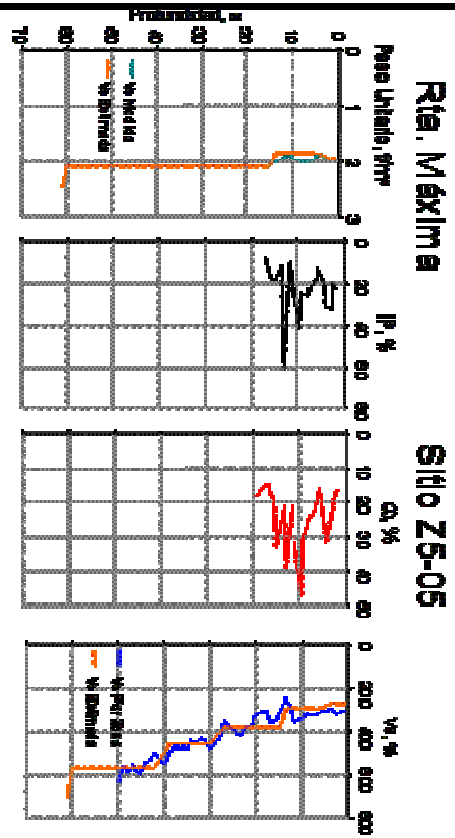
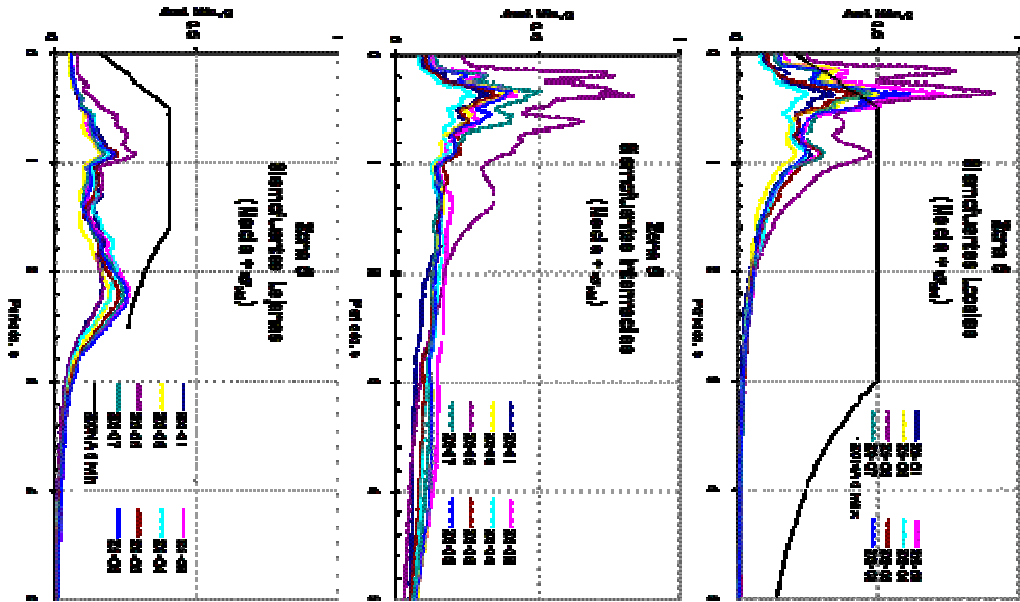


Profundidad Roca : 13 m

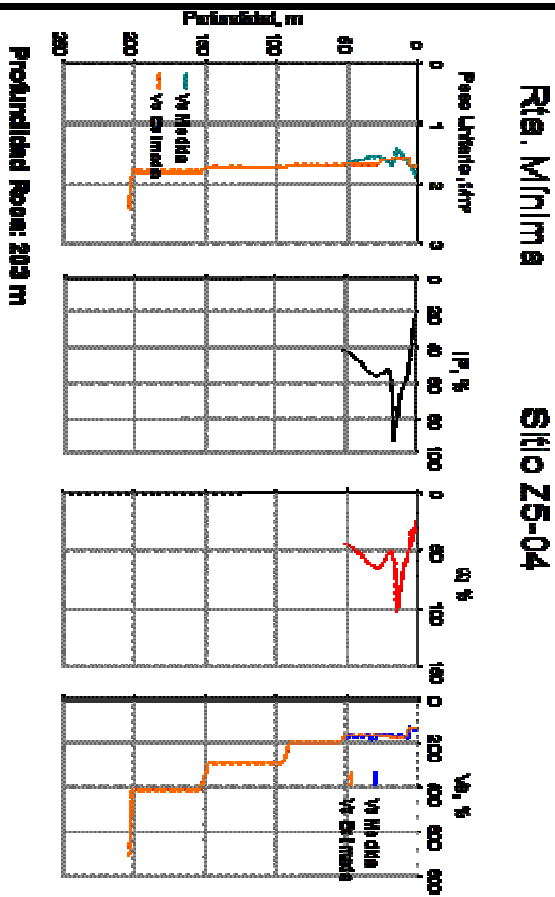








Profundidad Base: 01 m



Profundidad Base: 203 m

