



ALCALDIA MAYOR
DE BOGOTA D.C.

Fondo de Prevención
ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

MARÍA CAROLINA ROGELIS
GRUPO DE ESTUDIOS TÉCNICOS
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
ÁREA TÉCNICA Y DE GESTIÓN
DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS - DPAE
DIAGONAL 47 No 77A-09
BOGOTA, COLOMBIA

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE
OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

PS 292 DE 2009

PS 304 DE 2010

VOL. 1 INFORME FINAL

ORIGINAL

Diciembre 2010

Nota Especial: De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE. Los derechos de autor están definidos en el marco del proyecto FORESEE Operational Flood Forecasting, Warning and Response for Multi-Scale Flood Risks in Developing Cities. La solicitud de reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al director del FOPAE.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE
OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá D.C.– FOPAE
Diagonal 47 # 77 A 09 Interior 11
PBX: 4292801
www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co
Bogotá – Colombia

Director: Ing. Guillermo Escobar Castro

Subdirectora Técnica y de Gestión: Ing. Lucy González

Coordinador de Investigación y Desarrollo: Ing. Lindon Losada

Responsable Grupo de Estudios Técnicos: Ing. Fernando Ospina

Elaborado por: María Carolina Rogelis Prada - MSc Hidráulica

Publicación autorizada por la dirección del FOPAE, no es negociable y su reproducción total o parcial obliga a dar al FOPAE el crédito que le corresponde como uno de los autores del documento en el marco del proyecto FORESEE - Operational Flood Forecasting, Warning and Response for Multi-Scale Flood Risks in Developing Cities.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	7
2	Alcance.....	9
3	Metodología y teoría aplicada.....	10
3.1	Estaciones mixtas.....	10
3.2	Red de estaciones de precipitación.....	10
3.3	Geoestadística.....	11
3.3.1	Kriging.....	11
3.4	Variograma.....	12
3.5	Varianza y variograma climatológico.....	13
3.6	Simulated annealing (SA) o recocido simulado.....	14
3.7	Software utilizado.....	15
3.8	Aplicación al caso de estudio.....	15
4	Localización de las estaciones de nivel.....	17
4.1	<i>Recomendaciones del estudio "Diseño y Ampliación de la Red hidrometeorológica de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo"</i>	17
4.2	<i>Recomendaciones del estudio "Análisis e Investigación de procesos de Avenidas Torrencales como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristobal"</i>	21
4.3	RECOMENDACIÓN FINAL DE LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES MIXTAS.....	22
4.4	RECOMENDACIÓN ADICIONAL ESTACIÓN GRAVILLERAS.....	24
5	Localización de las estaciones de precipitación.....	26
5.1	VARIOGRAMAS UTILIZADOS.....	26
5.2	ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN CONSIDERADAS.....	31
5.3	RESULTADOS PARA CADA ESCENARIO.....	33
5.3.1	Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).....	33
5.3.2	Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de tres estaciones mixtas.....	34
5.3.3	Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)	36
5.3.4	Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y las mixtas FOPAE proyectadas.....	37
5.3.5	Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), las mixtas FOPAE proyectadas y las estaciones proyectadas de la EAAB.....	39
5.3.6	Definición de áreas para localización de estaciones.....	40
6	Conclusiones.....	51
7	Recomendaciones.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento para la optimización de la localización de las estaciones de precipitación	16
Figura 2. Red hidrológica optima recomendada por IDEAM (2007)	18
Figura 3. Red hidrológica optima recomendada por IDEAM (2007) zoom de la zona norte de la ciudad.....	19
Figura 4. Red hidrológica optima recomendada por IDEAM (2007) zoom de la zona sur oriental de la ciudad	20
Figura 5. Localización recomendada estudio UNAL (2006)	22
Figura 6. Localización recomendada de las estaciones mixtas	23
Figura 7. Registros del sensor gravilleras (izquierda) y caudales medidos en la Rápida de CEMEX en la zona de gravilleras (derecha) para la creciente del 17 de noviembre de 2010.....	24
Figura 8. Variogramas de precipitación diaria utilizados en el análisis	28
Figura 9. Variables utilizadas para aplicar Kriging con deriva	29
Figura 10. Variograma residual utilizado para aplicar Kriging con deriva externa	29
Figura 11. Escenarios utilizados para optimización geoestadística.....	30
Figura 12. Área de estudio	31
Figura 13. Estaciones existentes y proyectadas por las entidades del Distrito	32
Figura 14. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y con la estación logística fija.....	34
Figura 15. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y moviendo la estación Logística.....	34
Figura 16. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y mixtas proyectadas y con la estación logística fija.....	35
Figura 17. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y moviendo la estación Logística.....	35
Figura 18. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)	37
Figura 19. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)	37
Figura 20. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas	38
Figura 21. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas	38
Figura 22. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas	39
Figura 23. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas	39
Figura 24. Análisis de aéreas de localización y prioridad asignada	41
Figura 25. Priorización detallada de áreas de localización	42
Figura 26. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca alta del río Tunjuelo	43

Figura 27. Viviendas identificadas en la zona de localización óptima según variogramas exponencial y esférico en la zona A de la cuenca alta del río Tunjuelo.....	44
Figura 28. Viviendas identificadas en la Cuenca alta de la quebrada Limas.....	44
Figura 29. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca alta del río Tunjuelo.....	45
Figura 30. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca del río Fucha.....	46
Figura 31. Imagen satelital de la zona I.....	47
Figura 32. Imagen satelital de la zona J.....	47
Figura 34. Imagen satelital zona L.....	48
Figura 33. Zonas de localización de estaciones en la zona norte de la ciudad.....	48
Figura 35. Imagen satelital zona M.....	49
Figura 36. Imagen satelital zona N.....	49
Figura 37. Imagen satelital zona O.....	50
Figura 38. Imagen satelital zona P.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones del estudio “Análisis e Investigación de procesos de Avenidas Torrenciales como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristobal” en cuanto a localización de estaciones.....	21
Tabla 2. Registros tomados en la Rápida de CEMEX el 17 de noviembre de 2010.....	24
Tabla 3. Variogramas climatológicos.....	27

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS DE “SIMULATED ANNEALING” PARA TODOS LOS ESCENARIOS CONSIDERADOS.....	54
ANEXO B. INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE LOCALIZACIÓN DE SUS ESTACIONES PROYECTADAS.....	105

REGISTRO DE REVISIÓN DE DOCUMENTOS

■ Lista de distribución

Las copias de éste documento han sido entregadas a las siguientes dependencias del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE.

AREA O DEPENDENCIA	No de Copias
Copia No 1 Coordinación de Investigación y Desarrollo	1

■ Índice de modificaciones

ÍNDICE REVISIÓN	FECHA DE ENTREGA PARA REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
0	30-12-2010			

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de contar con datos en tiempo real para soportar el diseño y operación de Sistemas de Alerta Temprana, el FOPAE cuenta con un sistema de monitoreo de precipitación y niveles en tiempo real, cuyos principales antecedentes se resumen a continuación:

- A través del convenio especial de cooperación No. 017/1998CO entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE, se desarrolló el proyecto para el diseño, instalación y operación de la red de alertas de inundación por desbordamiento. En dicho proyecto se instaló una red de estaciones automáticas hidrometeorológicas compuesta por 10 estaciones de lluvia tipo Campbell que permiten conocer el comportamiento de la precipitación en tiempo real, para prevenir o disminuir, mediante la detección y emisión de alertas tempranas, la pérdida de vidas humanas y/o de bienes materiales, anticipándose a la ocurrencia de inundaciones y como medida alternativa ante la imposibilidad de reubicar a la totalidad de los pobladores amenazados por inundaciones en el sector sur – oriental de Bogotá.

A raíz de la emergencia de mayo y junio de 2002, el río Tunjuelo se constituyó un cuerpo de agua prioritario para el Distrito, cuyas zonas de amenaza de inundación por desbordamiento abarcan una alta proporción de las localidades de Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Kennedy y Bosa, de tal forma que se han dedicado innumerables esfuerzos para llevar a cabo un manejo adecuado de las inundaciones. Una de las medidas más importantes para el manejo de inundaciones lo constituye la adquisición de tres sensores de nivel compatibles con el sistema Campbell del río Tunjuelo, uno (1) para la estación San Benito (estación de las 10 primeras instaladas) y dos (2) más que se instalaron en estaciones nuevas tipo Campbell las cuales se denominaron Kennedy e Independencia.

- Dada la necesidad de ampliar la cobertura de la Red Hidrometeorológica de Bogotá (RHB) tipo Campbell, a finales del año 2004, se suscribió el Convenio Especial de Cooperación No. 550-2004 (198/04 IDEAM) celebrado entre el FOPAE y el IDEAM, con el fin de ampliar la red de estaciones Hidrometeorológicas del Distrito y profundizar en el conocimiento de la climatología de la ciudad; en el marco de este convenio se instalaron 7 nuevas estaciones de campo, y dos estaciones base en IDEAM y FOPAE, las cuales entraron en funcionamiento hacia finales del mes de junio del 2007 y son denominadas estaciones tipo MOTOROLA.

Las estaciones tipo Motorola (todas con RTU Moscad L de Motorola) están compuestas por 6 estaciones de lluvia que permiten conocer el comportamiento de la precipitación y 1 estación de nivel del río; las estaciones base instaladas en este proyecto funcionan como sistema receptor para las estaciones de campo, la estación base IDEAM funciona

como “espejo” de la estación base FOPAE, es decir que la estación sólo recibe la información una vez es solicitada por la estación base FOPAE y en caso de falla de la estación base FOPAE la estación base IDEAM puede ser configurada como estación principal para recibir la información de las estaciones de campo hasta que entre nuevamente en funcionamiento la estación base FOPAE.

- A través de un proyecto de cooperación con la Agencia de Cooperación Internacional de Japon (JICA) se instalaron dos estaciones marca Motorola, de acuerdo a la solicitud de la DPAE en cuanto a la total compatibilidad de los equipos con el sistema actual de propiedad del FOPAE, estos equipos fueron instalados en el año 2007 y fueron donados a la DPAE-FOPAE en abril de 2008.

En resumen la Red hidrometeorológica de Bogotá está compuesta por 21 estaciones de campo, 12 estaciones tipo Campbell y 9 estaciones tipo Motorola, estas estaciones monitorean la zona centro y sur de los cerros orientales y parte de la cuenca del río Tunjuelo; sin embargo, la DPAE no cuenta con estaciones en tiempo real (lluvias y niveles) en la zona norte de los cerros orientales y la parte norte y occidental del área urbana de la ciudad.

Previamente, a través de otros estudios, el FOPAE identificó la necesidad de ampliar la Red Hidrometeorológica de Bogotá hacia la parte nororiental, norte y occidental de la ciudad y también la actualización de las estaciones del sistema Campbell para asegurar el funcionamiento de los puntos de monitoreo existentes. Consecuentemente, el FOPAE planteó realizar una renovación tecnológica y de equipos, haciéndose necesario instalar once (11) estaciones hidrometeorológicas nuevas de última tecnología, 100% compatibles con alguno de los dos sistemas con que actualmente cuenta el FOPAE. Debido a que los equipos actuales se encuentran en funcionamiento y son de gran importancia para los Sistemas de Alerta Temprana que actualmente ejecuta la DPAE, esta renovación planea instalar las estaciones nuevas en el mismo lugar de emplazamiento de las estaciones actuales tipo Campbell para que estas reemplacen a las mismas; una vez las nuevas estaciones estén calibradas, las estaciones Campbell serán retiradas del sitio y llevadas a una nueva localización.

El presente estudio busca proponer la nueva localización de las estaciones Campbell de acuerdo con lo planteado previamente por el FOPAE. La localización de dichas estaciones se establecerá mediante la utilización de técnicas geoestadísticas que permitan la identificación de una posición óptima de las estaciones para el objetivo de contar con la mejor descripción posible de los campos de precipitación en la ciudad de Bogotá.

Este estudio es producto del proyecto de investigación **FORESEE- Operational Flood Forecasting, Warning and Response for Multi-Scale Flood Risks in Developing Cities** en donde participa el UNESCO – IHE, la Universidad Javeriana, la Universidad del Valle y el FOPAE en un esfuerzo conjunto por avanzar en el conocimiento para el desarrollo de sistemas de alerta temprana de inundaciones.

2 ALCANCE

Este estudio busca recomendar una localización preliminar con base en criterios de optimización geoestadística. No tiene el alcance para establecer una localización definitiva debido a que dicha localización depende no solo de criterios matemáticos de optimalidad sino que también involucra aspectos de gran importancia como la seguridad de los equipos, la factibilidad a nivel de instalación de equipos, condiciones adecuadas a nivel de transmisión y factibilidad a nivel de contar con un espacio para la localización de las estaciones a nivel administrativo.

La información utilizada para recomendar un área para la localización de las estaciones corresponde a la disponible para el FOPAE a octubre de 2010. Dicha información no solo involucra los datos proporcionados por las demás entidades del Distrito que cuentan con estaciones telemétricas en el Distrito sino la información proporcionada por la EAAB sobre las estaciones que planea instalar en el Distrito. Al respecto, vale la pena mencionar que la EAAB no proporcionó coordenadas de sus estaciones proyectadas sino una localización aproximada de las mismas.

Se partirá del hecho de que la Entidad decidió que el número de estaciones localizar corresponde a 8 (9 en caso de que se decida relocalizar la estación Logística) estaciones de precipitación y 3 mixtas, por lo cual el estudio no establece el número de estaciones requerido sino que se limita a recomendar la localización de 11 estaciones.

El estudio no tiene alcance para establecer costos de localización.

El área de análisis se limitó al área urbana de la ciudad de Bogotá y la cuenca del río Tunjuelo.

El estudio no tiene alcance para realizar trabajo de campo que conduzca a la evaluación de factibilidad de la localización de estaciones en el terreno, esta actividad corresponde a una segunda etapa en el proyecto de ampliación de la red hidrometeorológica de Bogotá.

3 METODOLOGÍA Y TEORÍA APLICADA

Con el fin de proponer una localización para las estaciones actualmente disponibles en el FOPAE, se abordó inicialmente la localización de las estaciones mixtas y posteriormente la localización de las estaciones de precipitación.

3.1 ESTACIONES MIXTAS

Para proponer una localización para las estaciones mixtas se tuvo en cuenta prioritariamente la necesidad de medición de caudales con fines de alerta tanto en el río Bogotá como en sus principales afluentes. Para tal fin, se realizó una revisión bibliográfica de los estudios contratados por el FOPAE en donde se han realizado propuestas para localización de estaciones de nivel y con base en estas recomendaciones y las necesidades actuales de los sistemas de alerta se propuso una localización para las estaciones mixtas.

3.2 RED DE ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN

Con el fin de evaluar la localización óptima de nuevas estaciones de monitoreo teniendo en cuenta la red existente de estaciones se utilizarán como herramientas básicas la geoestadística y técnicas probabilísticas como Simulated annealing (SA) o recocido simulado.

Se consideraron varios escenarios con el fin de visualizar la sensibilidad de la localización. Dichos escenarios corresponden a:

- Solo las estaciones FOPAE actualmente existentes
- Las estaciones FOPAE actualmente existentes junto con las estaciones mixtas FOPAE proyectadas.
- Todas las estaciones existentes de todas las entidades
- Todas las estaciones existentes de todas las entidades junto con las estaciones mixtas FOPAE proyectadas.
- Todas las estaciones existentes, adicionalmente las proyectadas por la EAAB y las estaciones mixtas FOPAE proyectadas.

Para cada escenario se utilizó un variograma climatológico esférico, un variograma climatológico exponencial, el variograma de la tormenta ocurrida el 2 de abril de 2009 y el variograma de la tormenta ocurrida el 6 de septiembre de 2003.

En el diseño de una red los objetivos son la precisión y la minimización de costos. Tanto precisión como costos son funciones de la densidad de la red (número de estaciones de observación en el área de interés), localización de los sitios de monitoreo, e instrumentos utilizados (instrumentos de alta precisión son usualmente costosos). La precisión de la red también es función de la estocasticidad de la precipitación en términos de variación espacial y temporal (Bras and Rodríguez-Iturbe, 1976).

El enfoque a utilizar se basa en la minimización de la varianza estimada con el interpolador kriging. El kriging ordinario derivado de la teoría de variables regionalizadas, permite la

determinación de la varianza en cada localización de la nueva configuración de la red. En este caso es posible definir como función objetivo el promedio de la varianza y la varianza máxima. En este estudio se utilizarán los dos criterios y se compararán los resultados. La estimación de la varianza depende únicamente de la configuración de la red de monitoreo; sin embargo se debe definir un variograma que implícitamente modela el comportamiento espacial de la variable bajo consideración. Esta fase se denomina análisis estructural. Para el caso de este estudio, el análisis estructural fue llevado a cabo previamente y no hace parte de este informe, para su consulta se refiere al lector al “Estudio de los campos de precipitación de la ciudad de Bogotá, modelo geoestadístico de precipitación.”

El segundo paso consiste en la aplicación de Simulated annealing (SA) o recocido simulado que proporciona un número aleatorio de configuraciones que responde a la función objetivo. Este método es usado para encontrar el óptimo en problemas de combinación, cuando la solución óptima de un problema dado debe seleccionarse de entre un gran número de posibles soluciones disponibles sin necesidad de explorarlas todas.

3.3 GEOESTADÍSTICA

Desde un punto de vista geoestadístico la precipitación sobre una cuenca es modelada como un proceso estocástico, también conocido como una función aleatoria o un campo aleatorio bidimensional. Este enfoque permite estudiar la variabilidad de la precipitación en tiempo y espacio de una manera estadística (Pardo-Igúzquiza, 1998).

3.3.1 Kriging

Kriging es un nombre genérico adoptado para una familia de algoritmos de regresión de mínimos cuadrados en reconocimiento al trabajo pionero de Danie Krige. Todos los estimadores kriging son solo variantes del estimador de regresión lineal básica $Z^*(u)$ definido como (Goovaerts, 1997):

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})]$$

Donde $\lambda_{\alpha}(u)$ es el peso asignado al datum $z(u_{\alpha})$ interpretado como una realización de la variable aleatoria $Z(u_{\alpha})$. Los valores $m(u)$ y $m(u_{\alpha})$ son los valores esperados de las variables aleatorias $Z(u)$ y $Z(u_{\alpha})$. El número de datos involucrados en la estimación así como sus pesos pueden cambiar de una ubicación a otra. En la práctica, solo los $n(u)$ datos cercanos a la localización u que está siendo estimada son utilizados, por ejemplo, los datos en un área cercana dada o ventana $W(u)$ centrada en u .

La interpretación de los valores desconocidos $z(u)$ y de los valores $z(u_{\alpha})$ como realizaciones de las variables aleatorias $Z(u)$ y $Z(u_{\alpha})$ permiten definir la estimación del error como una variable aleatoria $Z^*(u) - Z(u)$. Todas las clases de kriging comparten el mismo objetivo de

minimizar la varianza bajo la restricción de insesgamiento del estimador; esto es (Goovaerts, 1997):

$\sigma^2_E(u) = Var\{Z^*(u) - Z(u)\}$ es minimizado bajo la restricción de:

$$E\{Z^*(u) - Z(u)\} = 0$$

El estimador kriging varía dependiendo del modelo adoptado para la función aleatoria $Z(u)$. La variable aleatoria $Z(u)$ es usualmente descompuesta en un componente residual $R(u)$ y un componente de tendencia $m(u)$:

$$Z(u) = R(u) + m(u)$$

El componente residual es modelado como un campo aleatorio estacionario con media cero y covarianza $C_R(h)$:

$$E\{R(u)\} = 0$$

$$Cov\{R(u), R(u+h)\} = E\{R(u)R(u+h)\} = C_R(h)$$

El valor esperado de la variable aleatoria Z en la ubicación u es el valor del componente de tendencia en esa localización:

$$E\{Z(u)\} = m(u)$$

En el caso de kriging ordinario (OK), éste tiene en cuenta fluctuaciones locales de la media limitando el dominio de estacionariedad de la media a un área local $W(u)$:

$$m(u^\wedge) = \text{constante pero desconocida } m(u^\wedge) = \forall u^\wedge \in W(u)$$

Para el caso de kriging con deriva (KED), la media es modelada como una función lineal de una o más variables secundarias y el variograma de los residuos es utilizado para estimar los pesos para solucionar el sistema kriging.

3.4 VARIOGRAMA

Un variograma muestra como la disimilaridad entre $Z(x)$ and $Z(x+h)$ se desarrolla con la separación h . Como la covarianza, es en general anisotrópica. Obviamente, el variograma es una función no negativa, cuyo valor es 0 en $h=0$ (Chiles and Delfiner, 1999).

Considerando una variable regional $\{z(x) : x \in D \subset R^n\}$, con valores conocidos $z = z(x)$ en N puntos de muestreo $\{x_i : i = 1, \dots, N\}$, la intuición sugiere que dos puntos que están cerca

tienen valores parecidos porque estos valores fueron generados bajo condiciones físicas similares. Por el contrario, a distancias largas las condiciones genéticas son diferentes y por lo tanto se esperan variaciones mayores. Esta intuición de variabilidad con distancia puede ser cuantificada con un variograma que corresponde a la gráfica de la mitad de la diferencia entre pares de puntos de muestreo al cuadrado como función de la distancia entre pares. Un variograma puede ser anisotrópico y por tanto calculado y graficado por clases de dirección. Si se denota por N los pares de puntos separados aproximadamente una distancia h , el variograma está definido por (Chiles and Delfiner, 1999):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{x_\beta - x_\alpha} [z(x_\beta) - z(x_\alpha)]^2$$

3.5 VARIANZA Y VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO

La varianza es una medida de la precisión del valor interpolado y es la herramienta básica para las técnicas de reducción de varianza para la selección óptima de localización de puntos de medición. La razón para esto es que la varianza solo depende del modelo de variograma, el número N de estaciones de precipitación y su localización en el espacio (Pardo-Igúzquiza, 1998).

Para la aplicación de un método de reducción de varianza para la localización de puntos de medición lo importante no es la varianza absoluta de las estimaciones sino su valor relativo entre diferentes alternativas para diferentes configuraciones de puntos de toma de datos. La razón para esto es el hecho bien conocido de que si el variograma es multiplicado por una constante, la estimación no cambia debido a que los pesos del sistema kriging no cambian y la varianza es escalada por el mismo factor. Esto no es verdadero si otros parámetros del variograma tales como tipo de modelo, nugget, anisotropía etc, cambian para diferentes eventos. La principal dificultad de los métodos de reducción de varianza es que un grupo óptimo de localizaciones de estaciones cambia de un evento a otro si los parámetros del variograma cambian (Pardo-Igúzquiza, 1998).

Una solución razonable es el uso del variograma climatológico (Bastin, Lorent et al., 1984) que consiste en adoptar un modelo de variograma de la forma:

$$\gamma(t_j, h) = \alpha(t_j)g(h, \beta)$$

Siendo $\alpha(t_j)$ un parámetro de escala (invariable en el espacio pero dependiente del tiempo); β un parámetro de forma (invariable en el tiempo pero dependiente en el espacio); $g(h, \beta)$ puede ser cualquier modelo de variograma (esférico, exponencial, gaussiano etc).

Usando este variograma, toda la no estacionariedad se concentra en el parámetro de escala $\alpha(t_j)$, mientras que el componente $g(h, \beta)$ (variograma climatológico escalado) es invariable en el

tiempo (Lebel and Bastin, 1985). De esta forma, la varianza escalada puede escribirse como (Pardo-Igúzquiza, 1998):

$$\sigma^2_E(t_j) = \alpha(t_j) \nu^2_E$$

$$\nu^2_E = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{g}(h_{iA}) - \bar{g}(h_{AA})$$

La varianza escalada ν^2_E solo depende de tres factores: del variograma climatológico escalado que es invariable en el tiempo, del número N y de la localización de las estaciones de precipitación. Éste es el enfoque adoptado en este estudio para la técnica de reducción de varianza utilizada ya que el diseño óptimo puede llevarse a cabo usando el variograma climatológico escalado y la solución óptima obtenida será adecuada para todos los eventos. Una vez se determina el variograma, la estimación de la varianza solo depende del número N y la localización de las estaciones. De esta forma, es posible calcular la varianza asociada con cualquier configuración de las estaciones y escoger la que minimiza la varianza (Pardo-Igúzquiza, 1998).

3.6 SIMULATED ANNEALING (SA) O RECOCIDO SIMULADO

La minimización de la función objetivo correspondiente a la varianza, es un problema de optimización combinatoria. El problema es no-lineal, sin solución analítica y es una función de los datos experimentales y con múltiples mínimos locales. "Simulated annealing" es una técnica de minimización global estocástica especialmente adecuada para esta clase de problema (Pardo-Igúzquiza, 1998).

La teoría de "simulated annealing" o SA está basada en la analogía con la organización de la red de átomos en un metal cuando sufre un proceso de cambio de temperatura (calentamiento abrupto y enfriamiento lento). Siguiendo este proceso, los átomos del metal cambian su organización a una configuración de bajo costo energético. En la analogía, la configuración de los átomos corresponde a aquella de los puntos de muestreo mientras que la función objetivo corresponde a la energía del sistema (Barca, Passarella et al., 2008).

En relación con redes de estaciones de precipitación, la energía de cada configuración está dada por el valor de la función objetivo y la temperatura es un parámetro ficticio que es calibrado empíricamente para cada grupo de datos. Al comienzo de la simulación la temperatura debe ser suficientemente alta para permitir la posibilidad de cualquier configuración de estaciones y el enfriamiento del sistema se lleva a cabo a través de una serie de pasos (Pardo-Igúzquiza, 1998).

En términos del algoritmo, con referencia a la analogía descrita, se asigna un valor inicial a la temperatura del sistema, posteriormente se escoge una configuración de inicio aleatoria de todas las posibles configuraciones y se determina el valor correspondiente de la función objetivo, que es llamado energía. La temperatura determina la duración del proceso y en cada paso posterior se disminuye hasta cero, que corresponde a la temperatura final; entre más lento es el enfriamiento más alta es la probabilidad de encontrar la configuración óptima, y a mayor

temperatura inicial, mayor es la probabilidad de que la configuración final corresponda al óptimo absoluto que es el mínimo absoluto de la función objetivo (Barca, Passarella et al., 2008).

La configuración de inicio se perturba de una forma aleatoria, variando la posición de solo un punto de muestreo en la red de monitoreo cada vez, y el valor correspondiente de la función objetivo se calcula nuevamente. Si la configuración perturbada es mejor que la configuración previa (si la función objetivo disminuye) se asume como una solución transitoria excelente; de otra forma, la nueva configuración no se descarta automáticamente, como sucedería con un método clásico de optimización, sino que se somete a un criterio probabilístico de aceptación que lo compara nuevamente con la configuración transitoria óptima. Si este criterio probabilístico establece que la configuración es aceptable, ésta es aceptada como una solución óptima transitoria. En detalle esto sucede verificando la siguiente expresión (Barca, Passarella et al., 2008):

$$\exp\left(-\frac{\Delta E}{T_i}\right)$$

Donde ΔE representa la variación de la función objetivo, y T_i el valor actual del parámetro de temperatura es menor que un número generado aleatoriamente. Este test permite que el método evite que haya convergencia en un óptimo local en lugar de uno global (Barca, Passarella et al., 2008).

3.7 SOFTWARE UTILIZADO

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software R.

3.8 APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

Con el fin de obtener los variogramas experimentales, que representan el comportamiento espacial de la precipitación se realizó el análisis de 127 días con datos de precipitación representativos en el periodo 2000-2009. Este análisis se llevó a cabo en un estudio previo cuyo objetivo es el estudio de los campos de precipitación de la ciudad de Bogotá. De dicho estudio se obtuvieron los variogramas climatológicos y los variogramas ajustados para las 127 precipitaciones diarias de las cuales 2 variogramas fueron utilizados con el fin de revisar la sensibilidad de los resultados.

Adicionalmente, se revisó la información disponible en el FOPAE sobre la localización de las estaciones que cuentan con telemetría actualmente existentes y la información proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado – EAAB sobre las estaciones telemétricas que tiene proyectadas a corto plazo.

Posteriormente, con los insumos mencionados se pasó a la utilización del procedimiento de “Simulated annealing” para obtener una localización optimizada de las estaciones FOPAE. El procedimiento puede observarse en la Figura 1.

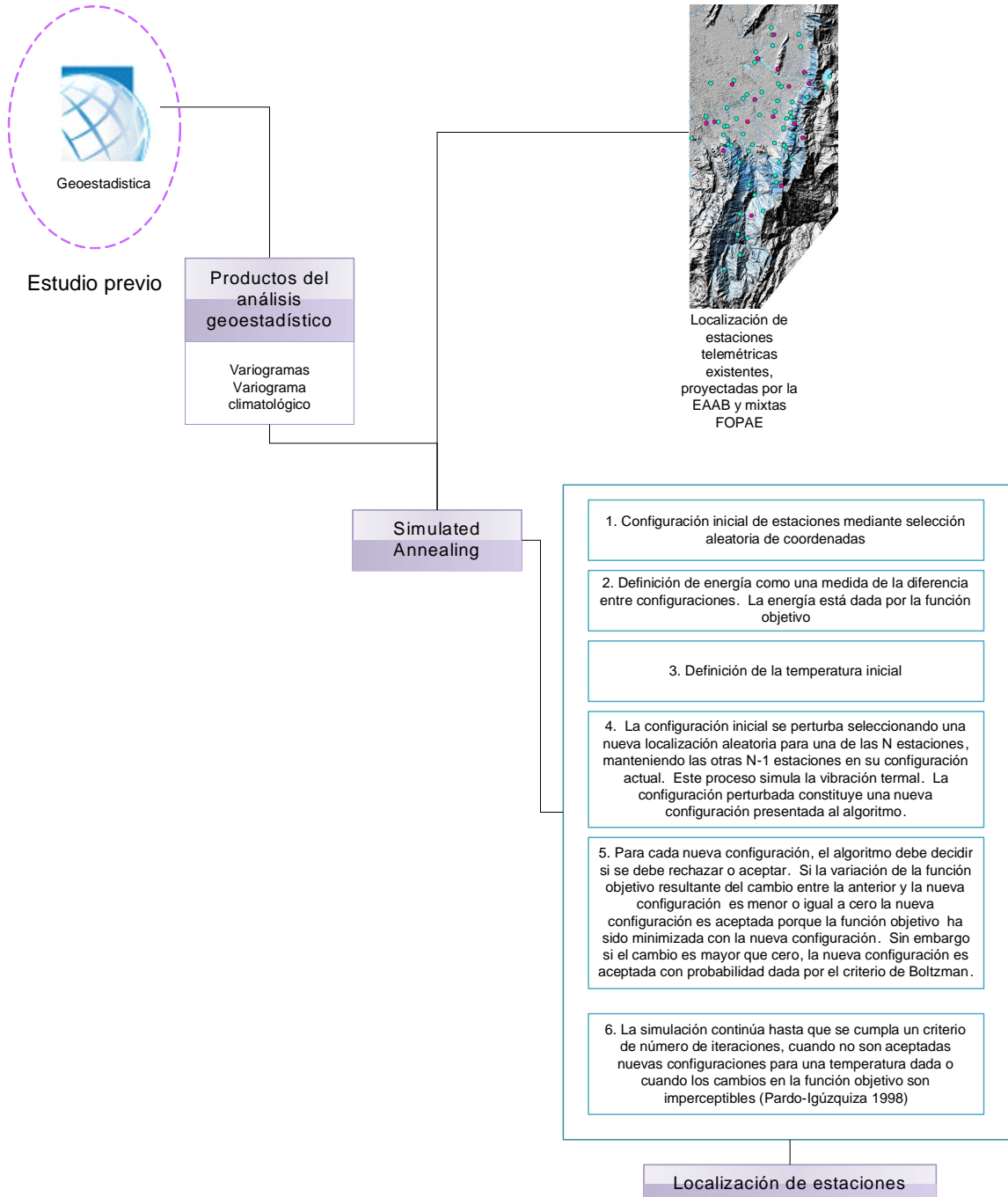


Figura 1. Procedimiento para la optimización de la localización de las estaciones de precipitación

4 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE NIVEL

Con el fin de recomendar una localización para las tres estaciones de nivel disponibles, se revisaron los estudios contratados por el FOPAE en los cuales se presentan recomendaciones sobre localización de estaciones de nivel. A continuación se resumen y analizan dichas recomendaciones.

4.1 RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO "DISEÑO Y AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO"

En este estudio el IDEAM (2007) utilizó los criterios de gradiente, correlativo y área representativa para evaluar el régimen hidrológico más representativo durante un evento característico de inundación y realizar una propuesta de red optimizada para la ciudad de Bogotá.

La red óptima propuesta por el IDEAM (2007) se muestra en Figura 2. En la Figura 3 se muestra un zoom de la zona norte de la ciudad en donde se escogieron dos estaciones de las propuestas por el IDEAM de la red óptima con el fin de:

ESTACIÓN # 38 EN EL HUMEDAL TORCA, esta estación permitirá:

- Contar con monitoreo en la zona del humedal Torca en la zona cercana a la Autopista que tiene antecedentes de inundación.
- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, con datos que a futuro pueden ser usados para calibración de los modelos hidrológicos de las cuencas aferentes localizadas en los Cerros Orientales.
- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, que pueda ser usado como condición de borde para el sistema de alerta del río Bogotá.
- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, para el sistema de alerta del sistema Torca.

ESTACIÓN # 33 EN EL RÍO JUAN AMARILLO CON AV 68, esta estación permitirá:

- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, con datos que a futuro pueden ser usados para calibración de los modelos hidrológicos de las cuencas aferentes localizadas en los Cerros Orientales.
- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, que pueda ser usado como condición de borde para el sistema de alerta del río Bogotá.
- Contar con un punto de medición de caudales y niveles, para el sistema de alerta del Río Juan Amarillo.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

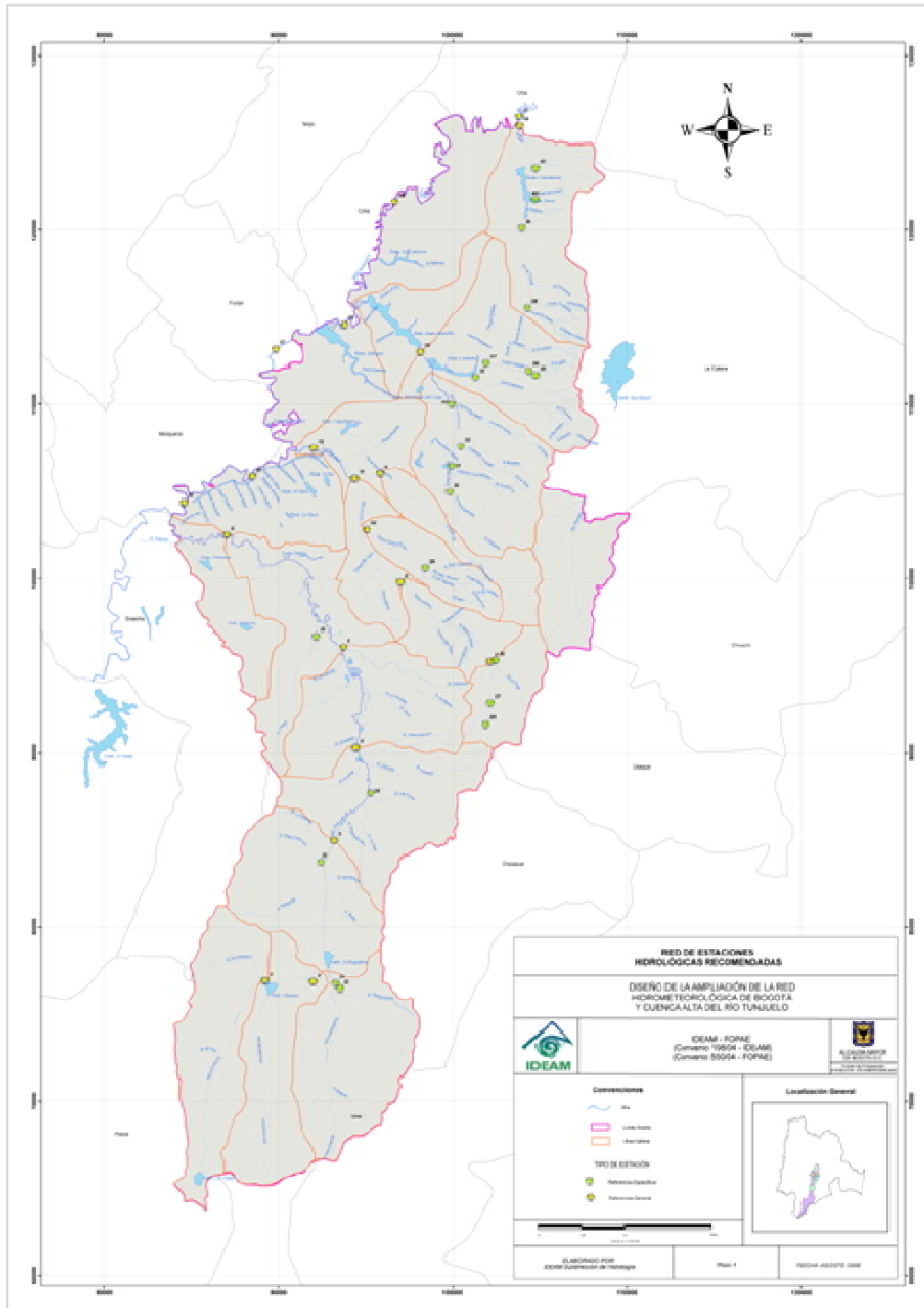


Figura 2. Red hidrológica óptima recomendada por IDEAM (2007)

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

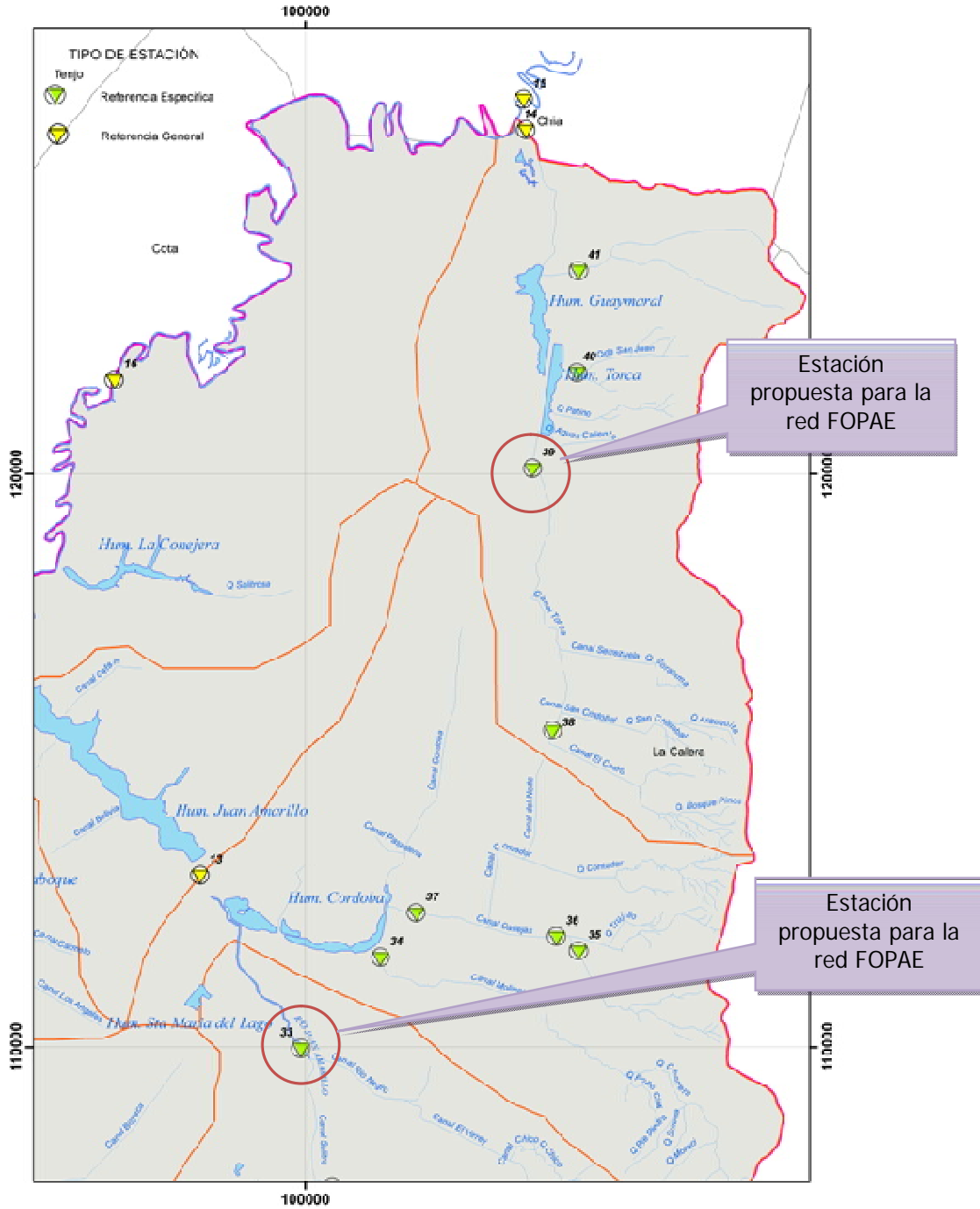


Figura 3. Red hidrológica óptima recomendada por IDEAM (2007) zoom de la zona norte de la ciudad

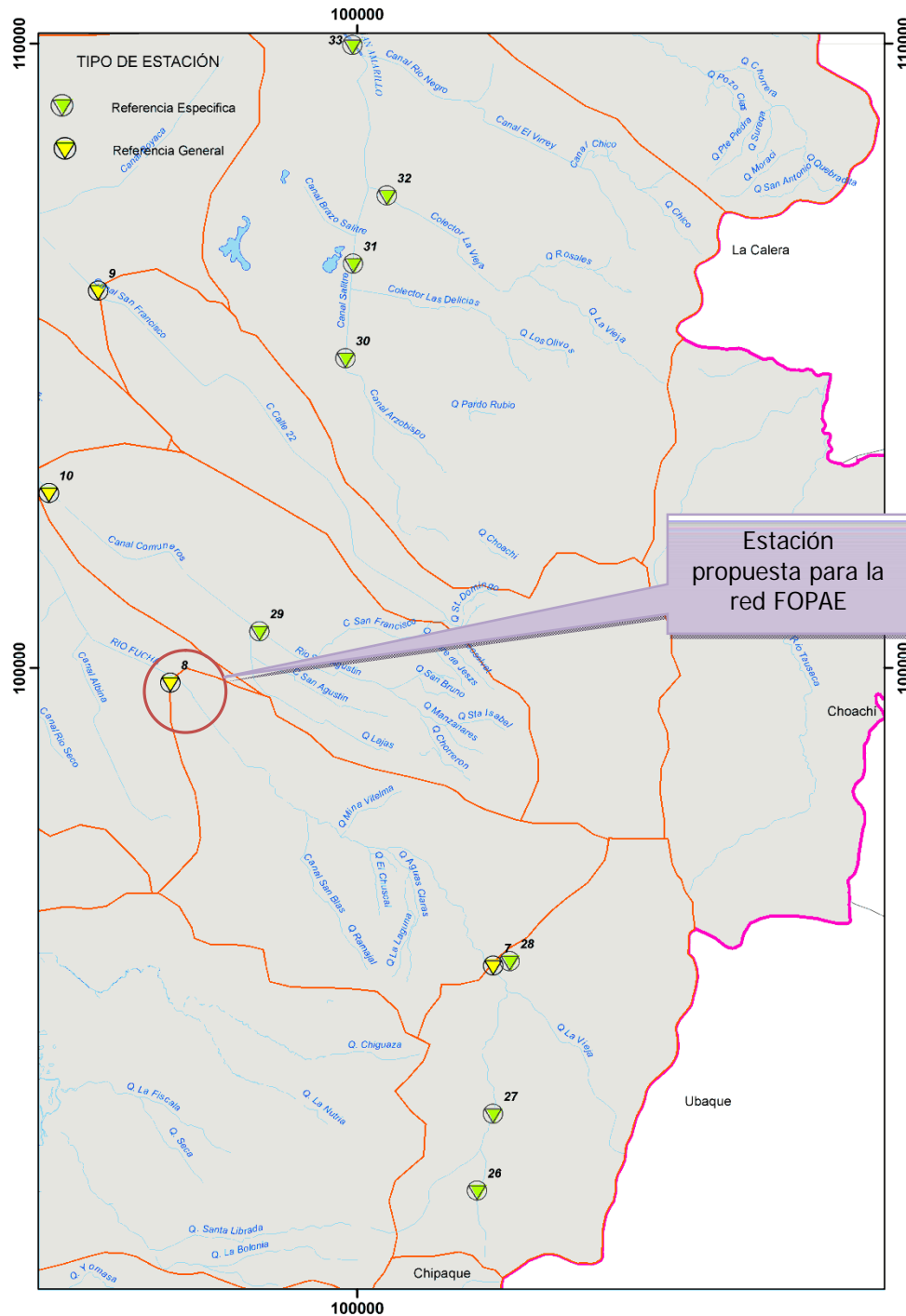


Figura 4. Red hidrológica óptima recomendada por IDEAM (2007) zoom de la zona sur oriental de la ciudad

El último lugar propuesto corresponde al punto # 8 en la cuenca del río Fucha. Esta estación permitiría el análisis hidrológico de la cuenca del río San Cristóbal y constituiría un punto de medición importante para establecer a futuro un sistema de alerta en el río Fucha.

De acuerdo con la información recopilada por el IDEAM (2007) en la avenida 68 con río Juan Amarillo y en el Canal Torca ya existen instaladas miras que pertenecen a la Secretaría de Ambiente, por lo tanto se recomienda que -si tales miras se encuentran operativas- el sistema telemétrico se integre a estas miras para que constituyan su sistema de respaldo y verificación.

4.2 RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO “ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE AVENIDAS TORRENCIALES COMO EVENTOS GENERADORES DE RIESGO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTOBAL”

Las principales recomendaciones realizadas en este estudio en lo que respecta a localización de nuevas estaciones telemétricas o puntos de monitoreo comunitario se muestran a continuación:

RECOMENDACIÓN

Una vez realizada la modelación hidrológica y teniendo en cuenta los tiempos de respuesta de la cuenca, se determinó que el monitoreo de parámetros debe ser enfocado específicamente a datos de precipitación en la parte alta de la cuenca. Además, se propone un monitoreo dirigido a establecer las condiciones de los afluentes Ramajal y La Pichosa por presentar alto impacto en la modelación.

Los resultados de la modelación del flujo y los análisis de amenaza muestran que en la parte alta por tener un cauce bastante amplio los niveles no cambian significativamente como para que sirvan de indicador para una alerta. Por el contrario, se observó que en la parte baja que a medida que se aumentan los caudales el cauce responde con flujos que aumentan su profundidad y velocidad, de manera que es más efectivo el monitoreo de la corriente en la parte baja. En este sentido es recomendable implementar un plan de apoyo comunitario para la lectura de las miras que se encuentran en el vertedero de la Estación El Delirio, En la Carrera 8ª A ESTE con calle 13 sur (Instituto de ciegos) y en el puente del parque San Cristóbal en la Transversal 1ª A ESTE con calle 12 sur. Estas dos últimas se encuentran entre las entregas de las Quebradas El Triángulo y Ramajal.

Como se menciona anteriormente, para pensar en la implementación de un SAT que se ajuste al modelo descrito en el documento, se debe iniciar con el establecimiento de un sistema de monitoreo de parámetros hidrológicos en tiempo real y registro de eventos asociados que permita determinar las condiciones críticas presentes en el área de estudio. En este sentido, y con el fin de monitorear precipitaciones en la parte alta de la cuenca se propone la adecuación de dos sitios de monitoreo, para la instalación de nuevos equipos telemétricos o la reubicación de los existentes. Los sitios propuestos son: la antigua estación de La María jurisdicción de la EAAB y el Cerro de La Teta, cuyo objetivo es el de establecer las condiciones que afectan directamente a los afluentes Ramajal y La Pichosa. Adicionalmente, se propone la automatización de los equipos de medición que se encuentran en El Delirio.

Se puede sugerir a partir de la información anterior que es recomendable instalar una nueva estación de registro automático en La María, con especificaciones similares a las que ya se cuenta. Se prefiere La María que El Delirio porque amplía la cobertura espacial y puede servir en el futuro para mejorar los niveles de alerta que se proponen posteriormente.

Con el fin de involucrar a la comunidad en el SAT se recomienda que dentro del programa de capacitación se instale una estación pluviométrica simple en la cabecera de la quebrada La Pichosa. Para este instrumento se puede solicitar a la comunidad la lectura cada seis horas y su reporte periódico a la DPAAE vía formato. En el caso de que los registros telemétricos definan una alerta verde se puede intensificar la frecuencia de lecturas a cada hora y reporte inmediato vía telefónica a la DPAAE, estos datos pueden ser utilizados como complemento de los datos automáticos y en especial para establecer un sistema de comunicación directa con la comunidad en caso de que el nivel de alerta se incremente.

Tabla 1. Recomendaciones del estudio “Análisis e Investigación de procesos de Avenidas Torrenciales como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristobal” en cuanto a localización de estaciones

Atendiendo estas recomendaciones la localización de las estaciones de nivel y la estación de precipitación se muestran en la Figura 5.

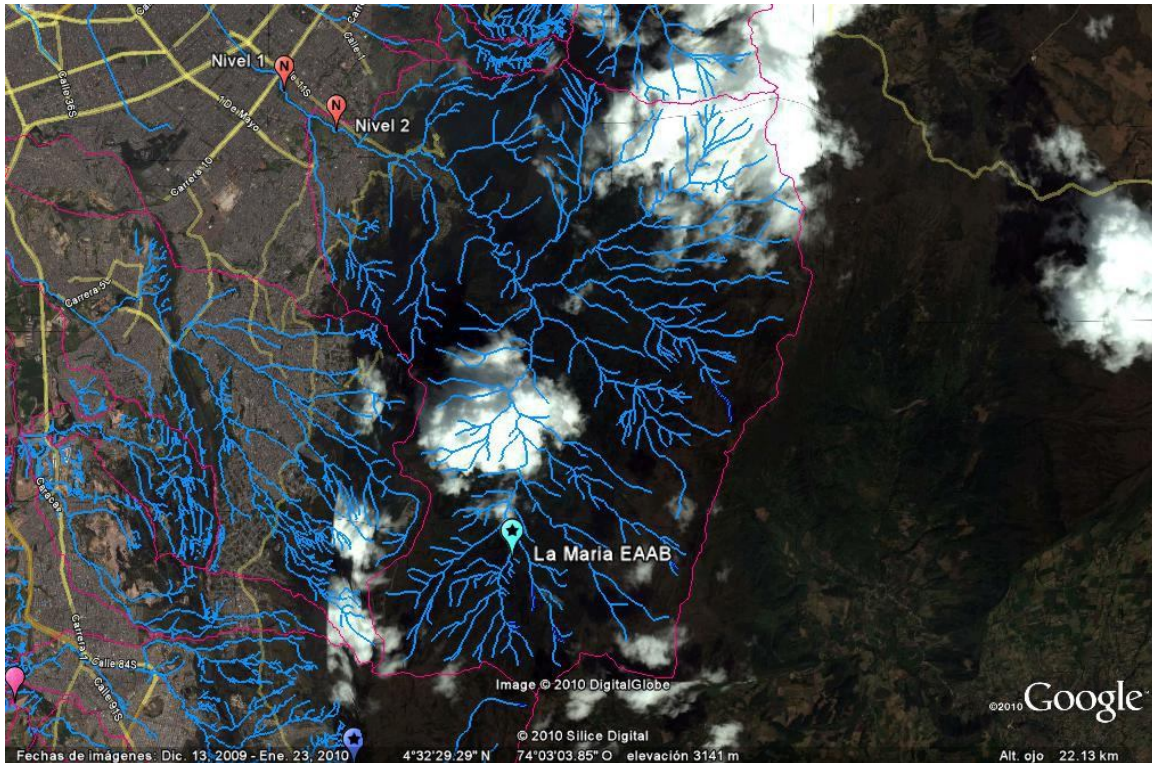


Figura 5. Localización recomendada estudio UNAL (2006)

Las estaciones de nivel que se encuentran localizadas en la Cra 8 A Este con calle 13 sur – Instituto de Ciegos y el Puente del Parque San Cristobal Trv 1 A Este con calle 12 Sur se encuentran localizadas unos metros aguas arriba de la estación recomendada por el IDEAM (2007), por lo cual se recomienda tener en cuenta todo el tramo y en campo determinar cuál es la mejor localización de la estación teniendo en cuenta aspectos como costos, seguridad y características hidráulicas.

4.3 RECOMENDACIÓN FINAL DE LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES MIXTAS

Del análisis anterior, la localización de las estaciones mixtas teniendo como criterio primordial la medición de caudales y niveles es la mostrada en la Figura 6.

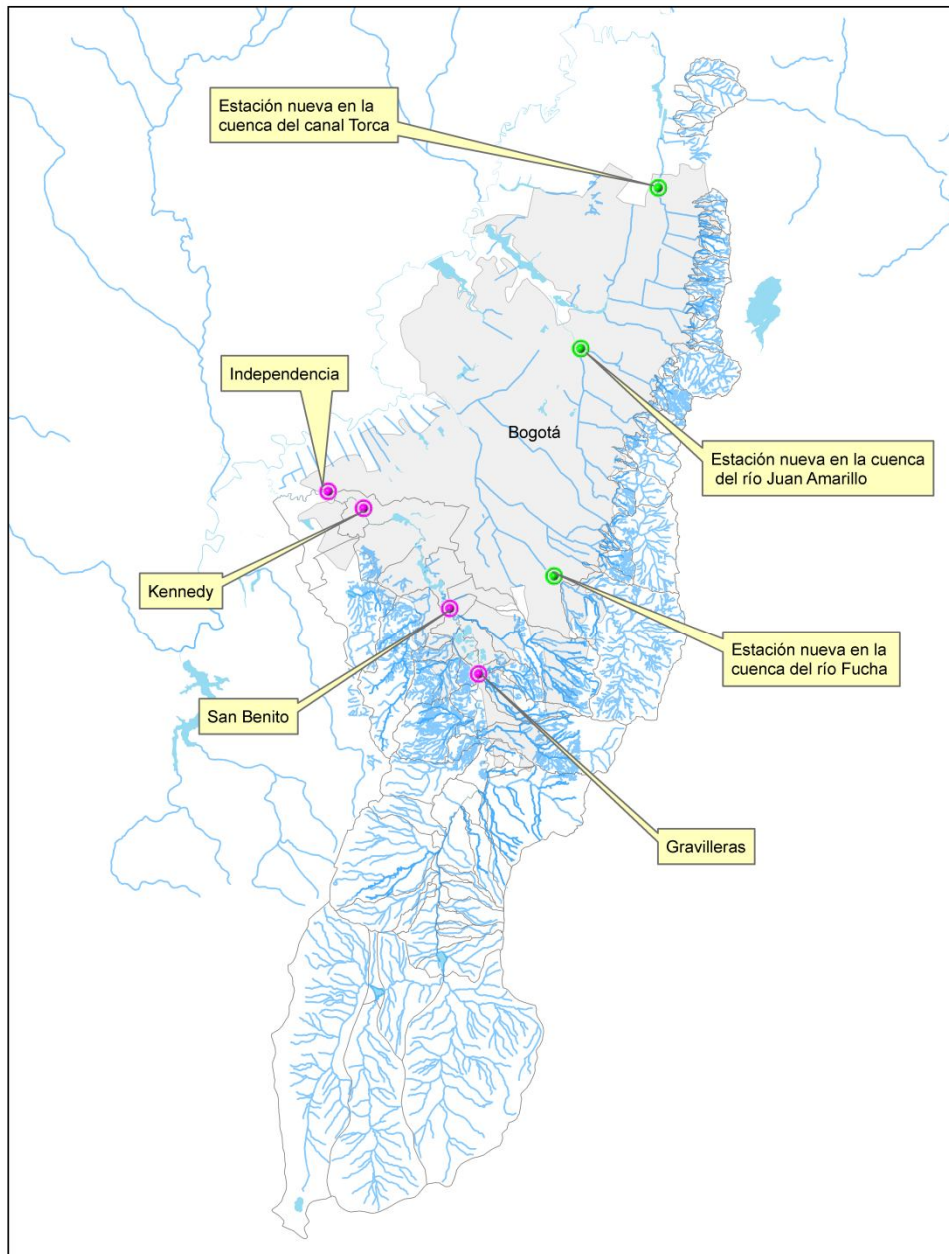


Figura 6. Localización recomendada de las estaciones mixtas

4.4 RECOMENDACIÓN ADICIONAL ESTACIÓN GRAVILLERAS

De la revisión de los datos de la estación Gravilleras durante las crecientes del río Tunjuelo, se ha concluido lo siguiente:

1. La estación gravilleras muestra ascensos en los niveles que son muy pequeños para aumentos considerables de caudal en el río Tunjuelo lo cual podría indicar que no es un sitio adecuado para medir caudales. En el caso de la creciente del día 17 de noviembre de 2010 por ejemplo, la estación mostró ascensos en el nivel del río de 27.5 cm para un aumento de caudal en el río de casi 55 m³/s (ver Figura 7).

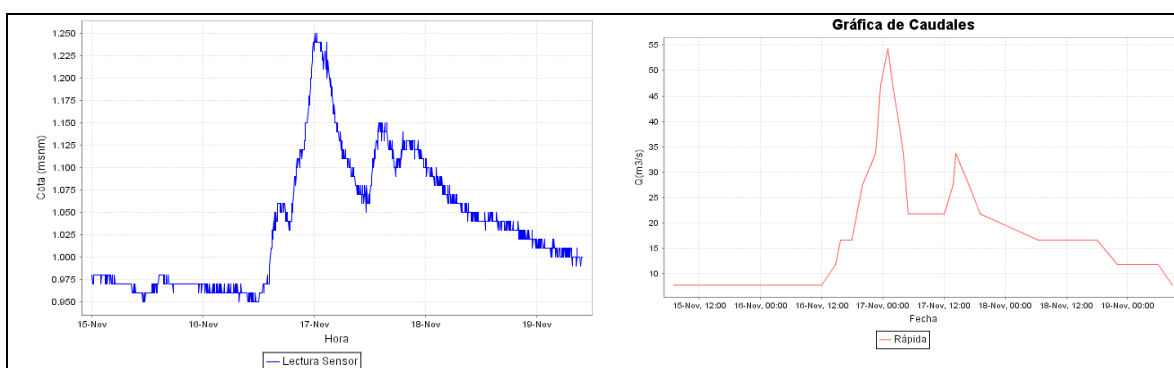


Figura 7. Registros del sensor gravilleras (izquierda) y caudales medidos en la Rápida de CEMEX en la zona de gravilleras (derecha) para la creciente del 17 de noviembre de 2010.

Caudal medido en la Rápida				
#	Fecha	Hora	Nivel (cm)	Caudal (m ³ /s)
1	2010-11-19	08:47	30.0	7.72
2	2010-11-19	06:00	40.0	11.88
3	2010-11-18	22:00	40.0	11.88
4	2010-11-18	18:00	50.0	16.6
5	2010-11-18	12:00	50.0	16.6
6	2010-11-18	06:27	50.0	16.6
7	2010-11-17	19:00	60.0	21.82
8	2010-11-17	16:47	70.0	27.5
9	2010-11-17	14:20	80.0	33.6
10	2010-11-17	13:47	70.0	27.5
11	2010-11-17	12:00	60.0	21.82
12	2010-11-17	06:00	60.0	21.82
13	2010-11-17	05:00	60.0	21.82
14	2010-11-17	04:30	70.0	27.5
15	2010-11-17	04:00	80.0	33.6
16	2010-11-17	03:00	90.0	40.09
17	2010-11-17	02:00	100.0	46.96
18	2010-11-17	01:00	110.0	54.17
19	2010-11-16	23:30	100.0	46.96
20	2010-11-16	23:00	90.0	40.09

Tabla 2. Registros tomados en la Rápida de CEMEX el 17 de noviembre de 2010

2. Esta estación está localizada aguas arriba de la entrega de la quebrada Santa Librada, por lo cual se considera más eficiente pensar en mover la estación aguas abajo al punto en donde se encuentra construida la rápida de CEMEX.
3. Actualmente los datos de la rápida son suministrados por CEMEX, y son tomados por un observador y posteriormente digitados en la página web del SIRE por CEMEX, pero sería una gran mejora si la estación se puede mover y eliminar la medición por el observador y reemplazarla por los datos del sensor en la rápida.

Adicionalmente se recomienda que se evalúe el futuro a corto plazo de la rápida con el fin de concluir sobre la factibilidad de realizar el cambio y que se lleven a cabo todos los estudios en campo y a nivel electrónico.

5 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN

Siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 1 se obtuvieron los puntos de localización de las estaciones teniendo en cuenta los escenarios que se muestran en la Figura 11, los resultados obtenidos mediante la aplicación de "simulated annealing" se encuentran en el ANEXO A.

Con respecto a los escenarios utilizados es importante mencionar que se consideró en primera medida la posibilidad de realizar una relocalización de la estación Logística debido a que en el estudio de "DISEÑO DE AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA DEL RÍO TUNJUELO". El IDEAM recomendó: *"La reubicación de la estación Decantador¹ o Vitelma, que por su cercanía (menos de 1 kilómetro), muestran una alta correlación en la información. La estación podría reinstalarse en el sector de la parte alta en cota aproximada de 3400, cerca al nacimiento de la quebrada Aguamonte, afluente de la quebrada Chiguaza, así se obtendría una mejor distribución, cobertura y un monitoreo de la precipitación en tiempo real en esta zona"*.

Debido a que la estación Vitelma se encuentra en un punto en donde existe una estación de la Secretaría de Ambiente que es telemétrica pero cuya programación no permite que los datos se reciban en tiempo cuasi-real y que a la fecha no existe ningún convenio que permita que los datos sean recibidos en el FOPAE, se consideró la relocalización de la estación Logística. Esta estación debido a su ubicación presenta inconvenientes para acceso y cualquier tipo de modificación que se requiera.

Adicionalmente a la relocalización de la estación Logística, se consideró un escenario en donde todas las estaciones existentes de las entidades que realizan monitoreo hidrometeorológico en Bogotá se tuvieron en cuenta; una segunda condición en donde además de las existentes de todas las entidades se consideraron las tres mixtas adicionales que se definieron en la sección anterior; una tercera condición donde además de las anteriores se consideraron las estaciones proyectadas por la EAAB según la información proporcionada por esta empresa cuyos soportes se encuentran en el ANEXO B; y finalmente se consideró la condición en donde solo opera la red FOPAE con y sin las tres estaciones mixtas definidas en la sección anterior.

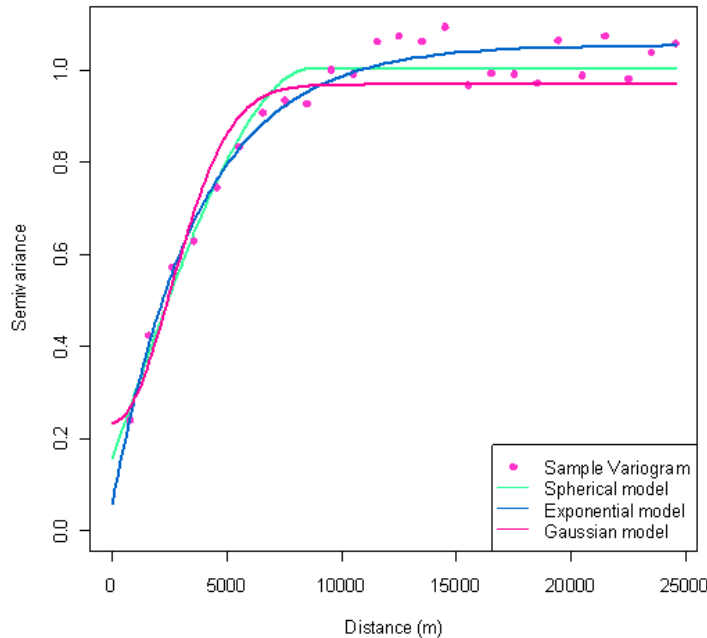
5.1 VARIOGRAMAS UTILIZADOS

Para describir la estructura espacial de la precipitación se utilizó como insumo uno de los productos del análisis de los campos de precipitación de la ciudad de Bogotá², correspondiente a los variogramas que se muestran en la Tabla 3. Los ajustes con menor error corresponden al

¹ La estación Decantador también es denominada Logística en la red FOPAE

² Estudio desarrollado en el marco del proyecto FORESEE: "Estudio de los campos de precipitación de la ciudad de Bogotá, modelo geoestadístico de precipitación".

exponencial y al esférico por lo cual los dos variogramas fueron utilizados para verificar la sensibilidad de los resultados ante el modelo utilizado.



	Sill	Range
Spherical model		
Nug	0.156596	
Sph	0.847899	8759.09
ERROR		5.40E-06
Exponential model		
Nug	0.058904	
Exp	0.995969	3731.01
ERROR		2.53E-06
Gaussian model		
Nug	0.234496	
Gau	0.733163	3603.469
ERROR		1.06E-05

Tabla 3. Variogramas climatológicos

Adicionalmente se utilizaron los variogramas de las precipitaciones registradas los días 1 de abril de 2009 y el 3 de septiembre de 2003. La primera corresponde a un variograma de rango largo relativamente en comparación con los rangos obtenidos del análisis de las 127 tormentas del estudio y el segundo corresponde a una distribución de precipitación de rango corto. La interpolación con kriging para la tormenta del 1 de abril de 2010 dio muy buenos resultados obteniéndose porcentajes de variabilidad explicada mayores al 70%, en el caso de la tormenta del 3 de septiembre de 2003 la habilidad del modelo para representar el campo de precipitación es pobre. La idea de utilizar estos variogramas consiste en verificar la sensibilidad de los resultados ante estructuras espaciales que difieren grandemente tal como puede observarse en la Figura 8.

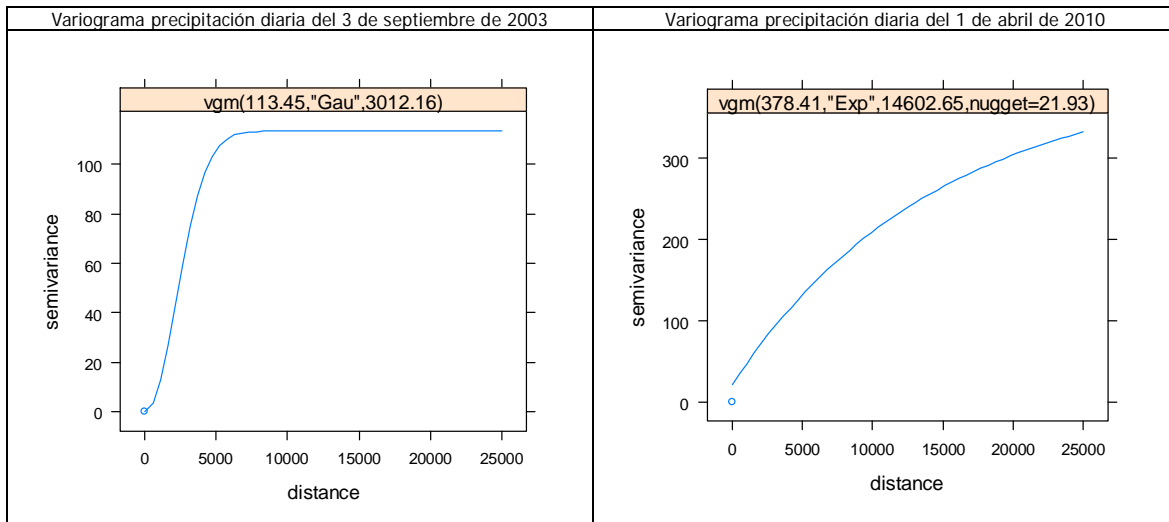


Figura 8. Variogramas de precipitación diaria utilizados en el análisis

Por último se utilizó el variograma residual correspondiente a la precipitación registrada el 1 de abril de 2009 debido a que para esta tormenta se obtuvo una correlación del 78% con parámetros topográficos. Los parámetros topográficos que exhibieron esta correlación con la precipitación son:

$$\text{Precipitación Diaria} \sim \text{DTM} + \text{mx_w_0_9} + \text{Elevación} + \text{Slope} + \text{Aspecto} + \text{Rango de elevación} + \text{q} + \text{MAX} + I(s2^2) + I(s1 * s2) + s1 + s2$$

La descripción de las variables se muestra en la Figura 9. Para la aplicación del Kriging con deriva se genera una malla con tamaño de pixel de 500x500 m a la que se asignan los parámetros. Cada parámetro fue calculado mediante el procesamiento de un modelo digital de terreno del área de estudio en el cual se utilizó una ventana de 10 km para realizar el suavizado de los parámetros. Para mayor detalle se recomienda consultar el "Estudio de los campos de precipitación de la ciudad de Bogotá, modelo geoestadístico de precipitación".

El variograma residual obtenido a través de la utilización de estos parámetros y a su vez usado para aplicar el kriging con deriva se muestra en la Figura 10.

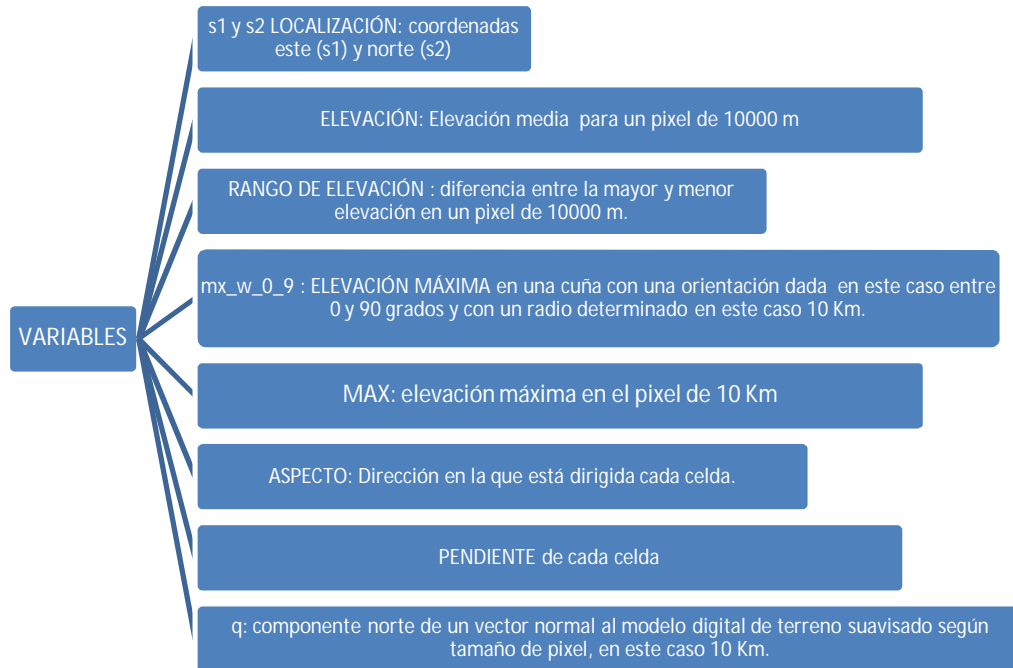


Figura 9. Variables utilizadas para aplicar Kriging con deriva

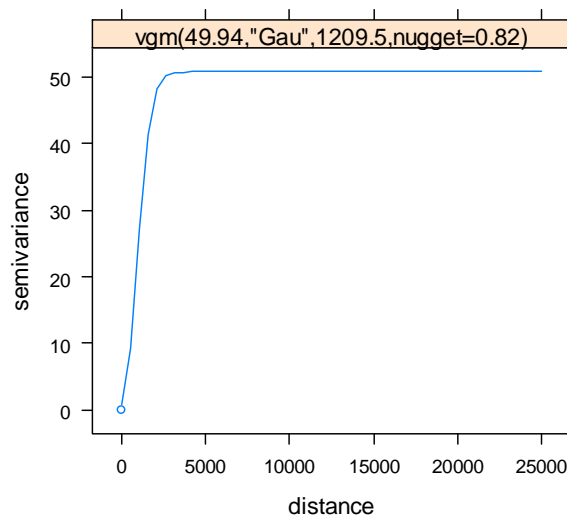


Figura 10. Variograma residual utilizado para aplicar Kriging con deriva externa

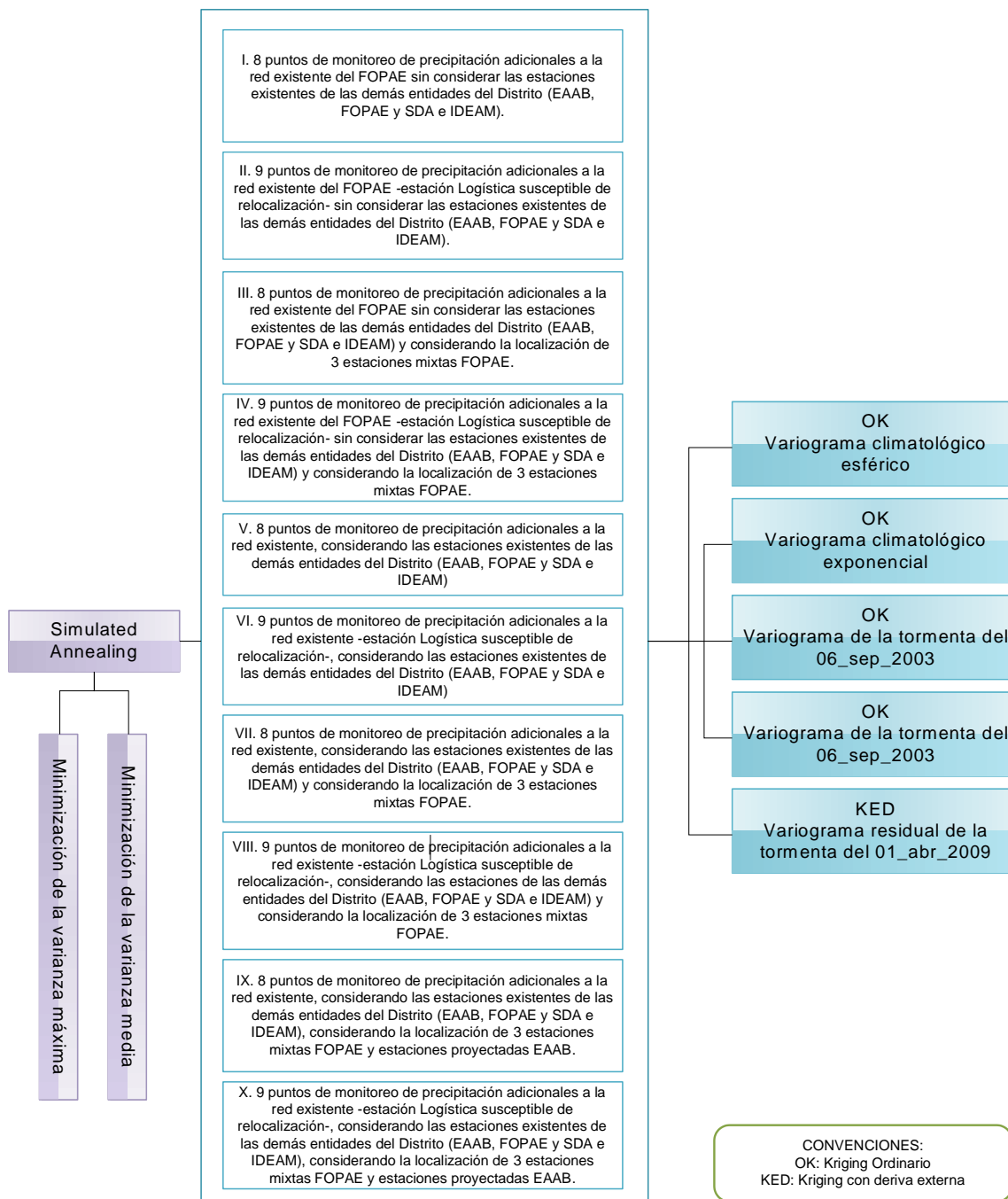


Figura 11. Escenarios utilizados para optimización geoestadística

5.2 ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN CONSIDERADAS

Las estaciones de precipitación existentes y proyectadas consideradas en los escenarios de análisis se muestran en la Figura 13.

En la Figura 12 se muestra el área de estudio o polígono utilizado para el proceso de optimización, es decir, el área sobre la cual se evalúa la varianza promedio o la máxima varianza según sea la función objetivo.

Cabe mencionar que las estaciones localizadas fuera del área de estudio mostrada en la Figura 12 no fueron consideradas, estas son: Pasca, Las Huertas y Tibaitatá por estar localizadas a una distancia considerable de la zona a monitorear y las estaciones Tambor y Puente Francis por encontrarse localizadas en el embalse San Rafael y al lado contrario de la divisoria de los Cerros Orientales.

La información de localización de las estaciones de cada entidad, fue obtenida directamente mediante consulta al personal encargado de la operación de la red como en el caso de la Secretaría de Ambiente – SDA y Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y mediante consulta del Sistema de Información Hidrológica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Es importante aclarar que no fueron consideradas estaciones de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá que aparecen en el Sistema de Información Hidrológica de la Empresa sin datos. Esto debido a que no se conoce la operación de estas estaciones y no se tiene acceso a sus datos.

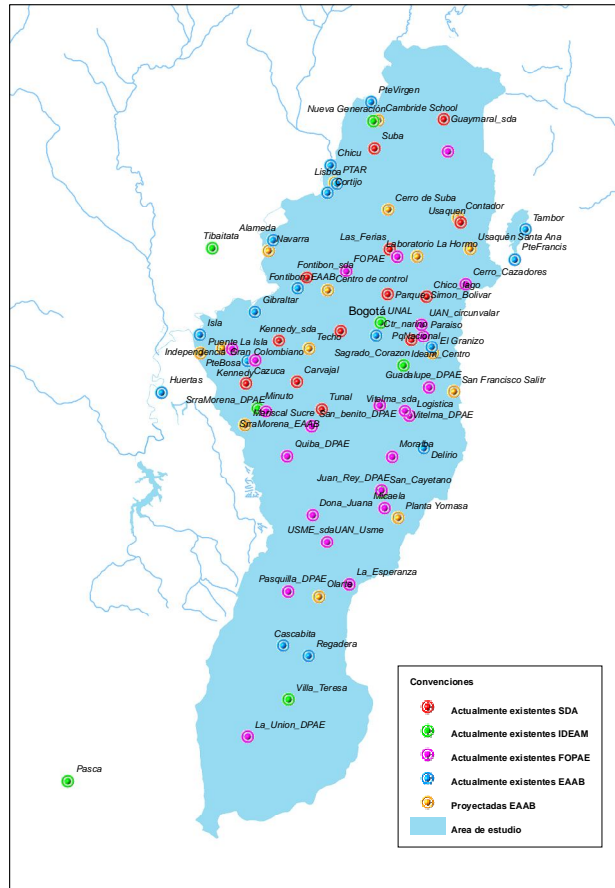


Figura 12. Área de estudio

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

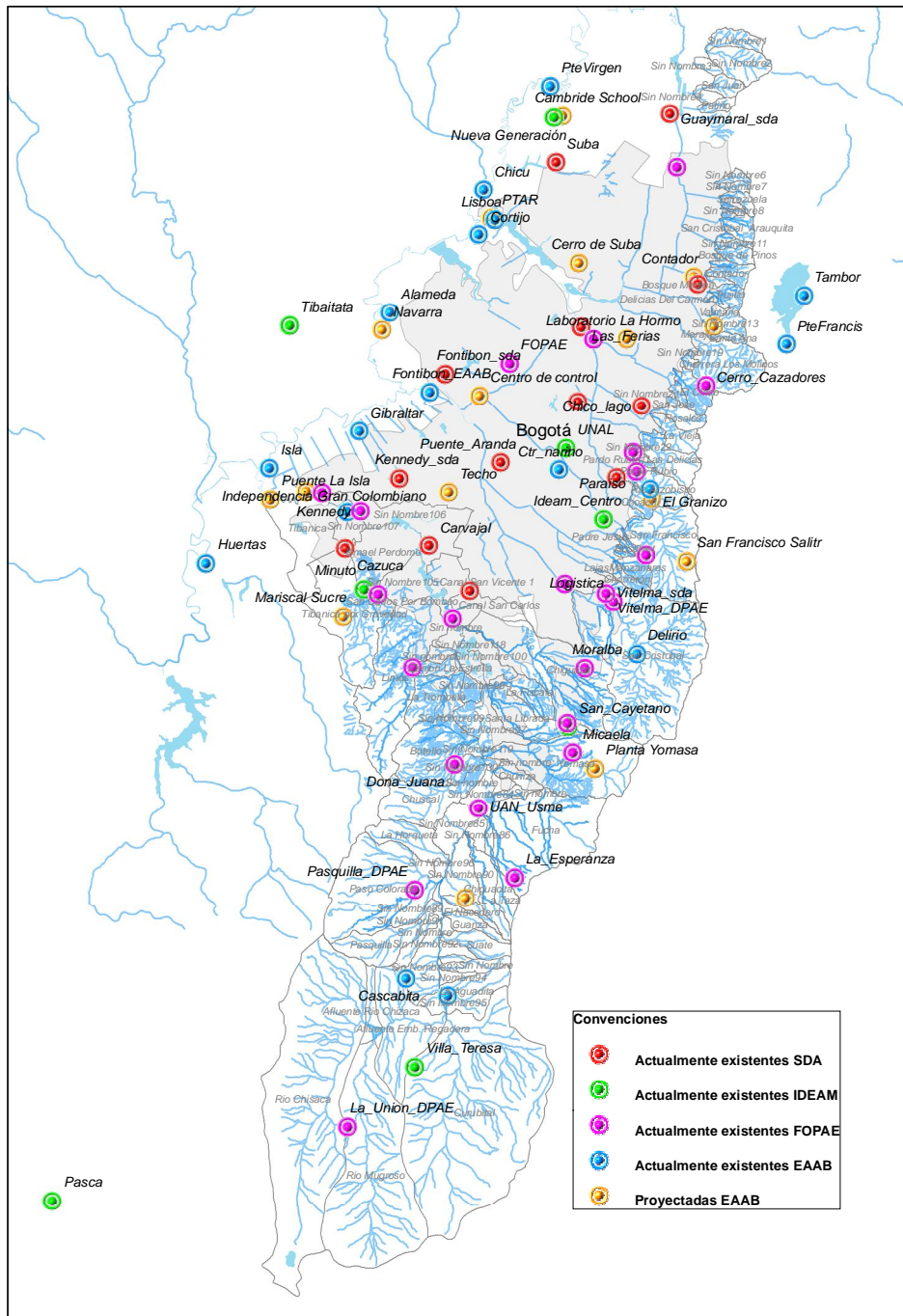


Figura 13. Estaciones existentes y proyectadas por las entidades del Distrito

5.3 RESULTADOS PARA CADA ESCENARIO

5.3.1 Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

Al Considerar una primera condición en donde solo se tienen en cuenta las estaciones existentes del FOPAE y utilizar los cinco variogramas que se muestran en la Figura 11, se obtuvieron los puntos de localización que se muestran en la Figura 14 y la Figura 15. En la Figura 14 se muestran los resultados cuando se considera que son posibles 8 estaciones adicionales y en la Figura 15 se considera el caso en el cual la estación Logística puede retirarse de su localización actual y pasar a otro punto. Del análisis de estos resultados se concluye lo siguiente:

- Existe una variabilidad importante en la localización de las estaciones dependiendo del variograma que sea utilizado para obtener la posición óptima. Sin embargo es posible identificar áreas en donde todas las simulaciones identifican la falta de estaciones de precipitación.
- Cuando se utiliza el criterio de minimización de la varianza máxima se obtienen recurrentemente posiciones de estaciones adicionales localizadas en el extremo del área de estudio dado que el algoritmo reduce la posibilidad de tener ubicaciones en el área de estudio que estén pobremente monitoreadas. En el caso de la varianza media los puntos se distribuyen más uniformemente en el área de estudio (Rossiter, 2010).
- De las dos figuras se concluye que serían necesarias entre tres y cuatro estaciones en la cuenca alta del río Tunjuelo.
- Se identifica que se requiere una estación adicional en la parte alta de la cuenca del río San Cristobal.
- En la zona central de la ciudad se requeriría otra estación en la cuenca del río Fucha.
- En la zona norte de la ciudad es donde más necesidad de estaciones se identifica siendo necesarias entre 3 y 4 estaciones.
- Las simulaciones –especialmente las que consideran el criterio de minimización de la varianza máxima- indican la necesidad de estaciones en el borde occidental constituido por el río Bogotá.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA



FORESEE

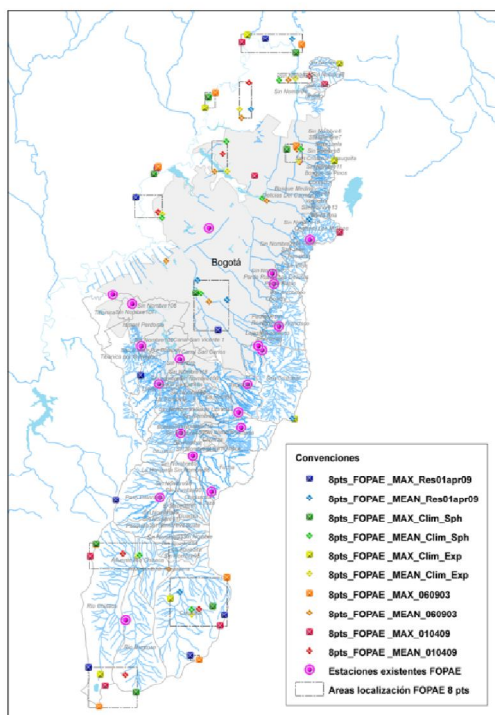


Figura 14. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y con la estación logística fija

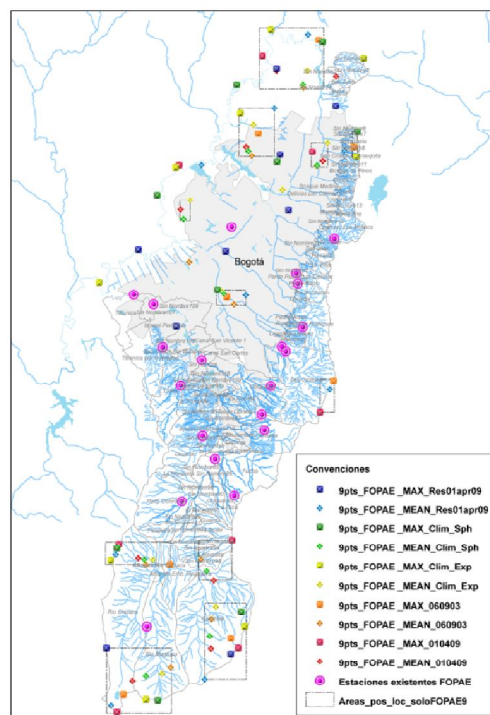


Figura 15. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y moviendo la estación Logística

5.3.2 Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de tres estaciones mixtas.

Al considerar la localización de los tres sensores de nivel que tendrían también sensores de precipitación, los resultados obtenidos con los cinco variogramas mostrados en la Figura 11 se muestran en la Figura 16 y Figura 17. En la Figura 16 se muestran los resultados cuando se considera que son posibles 8 estaciones adicionales y en la Figura 17 se considera el caso en el cual la estación Logística puede retirarse de su localización actual y pasar a otro punto. Del análisis de estos resultados se concluye lo siguiente:

- Existe una variabilidad importante en la localización de las estaciones dependiendo del variograma que sea utilizado para obtener la posición óptima. Sin embargo es posible identificar áreas en donde todas las simulaciones identifican la falta de una estación de precipitación.

- El efecto de incluir las estaciones mixtas consiste en que la localización óptima de las estaciones se desplaza alejándose de la zona en la que fueron localizadas estas estaciones, por lo cual se observa que la concentración de localizaciones óptimas se desplaza más hacia el occidente de la ciudad y hacia las zonas montañosas.
- Cuando se utiliza el criterio de minimización de la varianza máxima se obtienen recurrentemente posiciones de estaciones adicionales localizadas en el extremo del área de estudio dado que el algoritmo reduce la posibilidad de tener ubicaciones en el área de estudio que estén pobremente monitoreadas. En el caso de la varianza media los puntos se distribuyen más uniformemente en el área de estudio (Rossiter, 2010).
- De las dos figuras se concluye que serían necesarias entre dos y tres estaciones en la cuenca alta del río Tunjuelo.
- Se identifica que se requiere una estación adicional en la parte alta de la cuenca del río San Cristobal.
- En la zona central de la ciudad se requeriría otra estación en la cuenca del río Fucha.
- En la zona norte de la ciudad es donde más necesidad de estaciones se identifica siendo necesarias entre 3 y 4 estaciones.
- Las simulaciones –especialmente las que consideran el criterio de minimización de la varianza máxima- indican la necesidad de estaciones en el borde constituido por el río Bogotá.

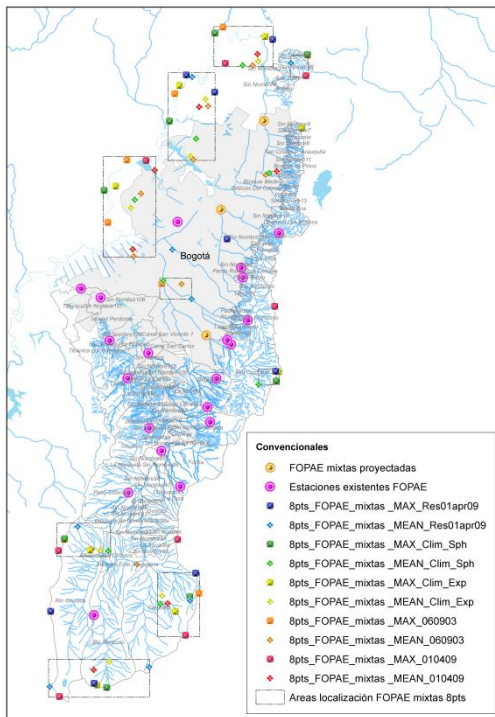


Figura 16. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y mixtas proyectadas y con la estación logística fija

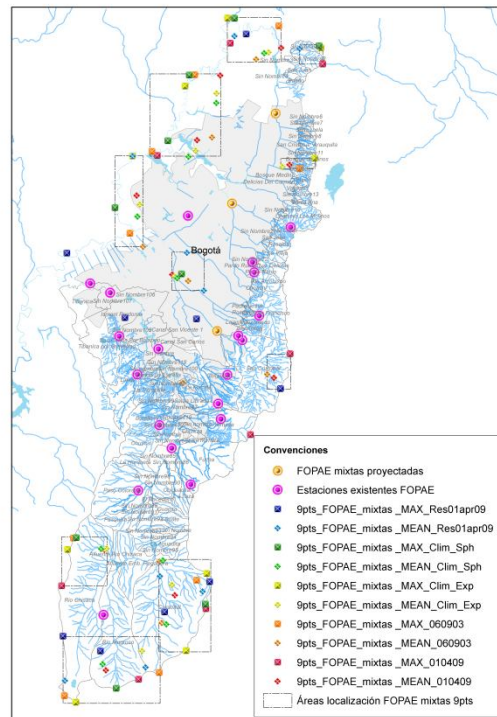


Figura 17. Puntos de localización de estaciones adicionales considerando solo las estaciones FOPAE existentes y moviendo la estación Logística

5.3.3 Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

Al considerar la localización de todas las estaciones existentes pertenecientes a las diferentes entidades sin considerar los tres sensores mixtos proyectados que pertenecerán al FOPAE, los resultados obtenidos con los cinco variogramas mostrados en la Figura 11 se muestran en la Figura 18 y la Figura 19. En la Figura 18 se muestran los resultados cuando se considera que son posibles 8 estaciones adicionales y en la Figura 19 se considera el caso en el cual la estación Logística puede retirarse de su localización actual y pasar a otro punto. Del análisis de estos resultados se concluye lo siguiente:

- Las estaciones existentes tienen un cubrimiento importante de la zona occidental de la ciudad, por lo cual la metodología aplicada ya no encuentra repetitivamente la necesidad de localizar estaciones en esta zona.
- La ubicación óptima obtenida mediante los diferentes variograma muestra zonas bien delimitadas y la dispersión que se identificó en los escenarios anteriores ya no es tan evidente.
- Cuando se utiliza el criterio de minimización de la varianza máxima se obtienen recurrentemente posiciones de estaciones adicionales localizadas en el extremo del área de estudio dado que el algoritmo reduce la posibilidad de tener ubicaciones en el área de estudio que estén pobremente monitoreadas. En el caso de la varianza media los puntos se distribuyen más uniformemente en el área de estudio (Rossiter, 2010).
- De las dos figuras se concluye que serían necesarias entre tres y cuatro estaciones en la cuenca alta del río Tunjuelo.
- Se identifica que se requiere una estación adicional en la parte alta de la cuenca del río San Cristobal.
- En la zona central de la ciudad se requeriría otra estación en la cuenca del río Fucha.
- Se identifica la necesidad de localización de una estación en la cuenca alta de la quebrada Limas.
- Se identifica la necesidad de una estación en la parte oriental del humedal Jaboque.
- En la zona norte de la ciudad es donde más necesidad de estaciones se identifica siendo necesarias entre 5 y 6 estaciones. Es posible identificar la necesidad de una estación en la zona del Cerro de Suba, una estación en la zona del humedal Guaymaral y tres estaciones localizadas en las cuencas de los Cerros Orientales.

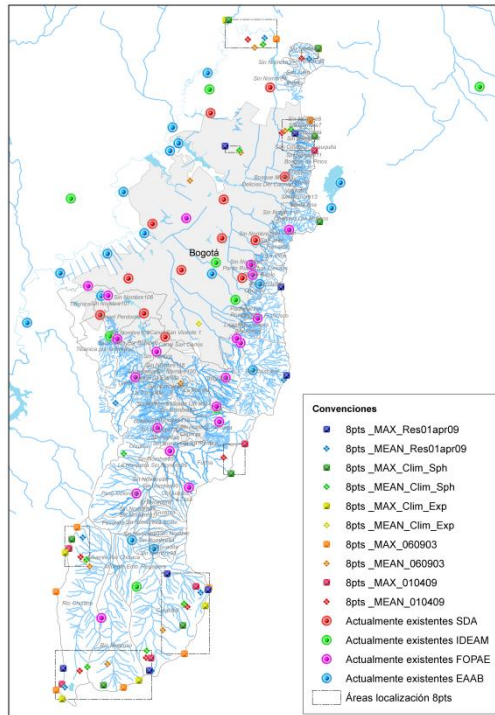


Figura 18. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

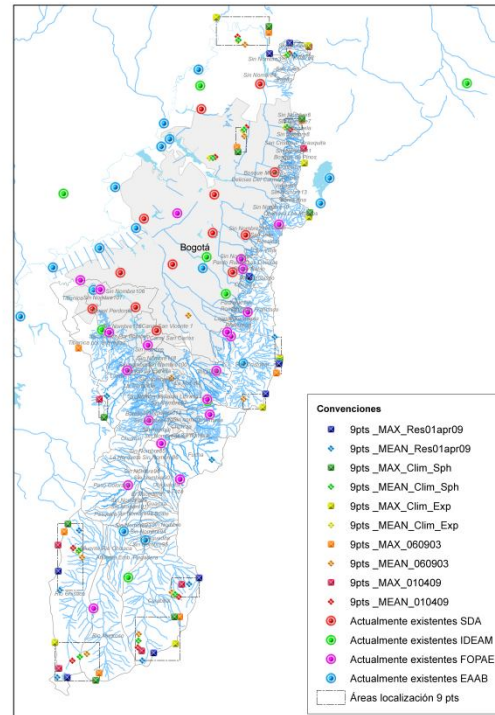


Figura 19. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

5.3.4 Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y las mixtas FOPAE proyectadas

Al considerar la localización de todas las estaciones existentes pertenecientes a las diferentes entidades considerando los tres sensores mixtos proyectados que pertenecerán al FOPAE, los resultados obtenidos con los cinco variogramas mostrados en la Figura 11 se muestran en la Figura 20 y Figura 21. En la Figura 20 se muestran los resultados cuando se considera que son posibles 8 estaciones adicionales y en la Figura 21 se considera el caso en el cual la estación Logística puede retirarse de su localización actual y pasar a otro punto. Del análisis de estos resultados se concluye lo siguiente:

- Las estaciones existentes tienen un cubrimiento importante de la zona occidental de la ciudad, por lo cual la metodología aplicada ya no encuentra la necesidad de localizar estaciones en esta zona.
- El efecto de incluir las estaciones mixtas proyectadas del FOPAE en el esquema de estaciones tiene un efecto menor en la localización óptima.

- La ubicación óptima obtenida mediante los diferentes variograma muestra zonas bien delimitadas.
- Cuando se utiliza el criterio de minimización de la varianza máxima se obtienen recurrentemente posiciones de estaciones adicionales localizadas en el extremo del área de estudio dado que el algoritmo reduce la posibilidad de tener ubicaciones en el área de estudio que estén pobremente monitoreadas. En el caso de la varianza media los puntos se distribuyen más uniformemente en el área de estudio (Rossiter, 2010).
- De las dos figuras se concluye que serían necesarias entre tres y cuatro estaciones en la cuenca alta del río Tunjuelo.
- Se identifica que se requiere una estación adicional en la parte alta de la cuenca del río San Cristobal.
- En la zona central de la ciudad se requeriría otra estación en la cuenca del río Fucha.
- Se identifica la necesidad de localización de una estación en la cuenca alta de la quebrada Limas.
- Se identifica la necesidad de una estación en la parte oriental del humedal Jaboque.
- En la zona norte de la ciudad es donde más necesidad de estaciones se identifica siendo necesarias entre 5 y 6 estaciones. Es posible identificar la necesidad de una estación en la zona del Cerro de Suba, una estación en la zona del humedal Guaymaral y tres estaciones localizadas en las cuencas de los Cerros Orientales.

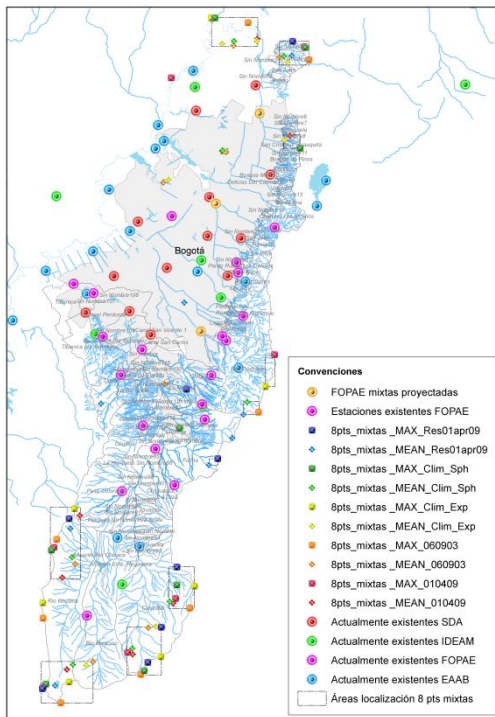


Figura 20. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas

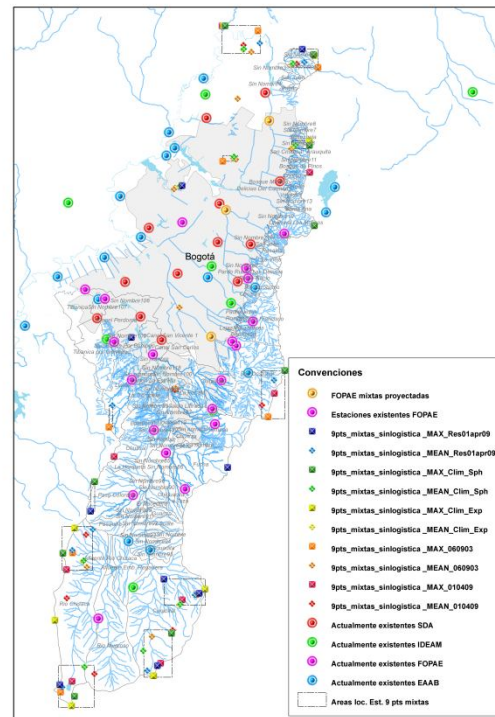


Figura 21. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas

5.3.5 Puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), las mixtas FOPAE proyectadas y las estaciones proyectadas de la EAAB

Al considerar la localización de todas las estaciones existentes pertenecientes a las diferentes entidades considerando los tres sensores mixtos proyectados que pertenecerán al FOPAE y las estaciones proyectadas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, los resultados obtenidos con los cinco variogramas mostrados en la Figura 11 se muestran en la Figura 22 y Figura 23. En la Figura 22 se muestran los resultados cuando se considera que son posibles 8 estaciones adicionales y en la Figura 23 se considera el caso en el cual la estación Logística puede retirarse de su localización actual y pasar a otro punto. Del análisis de estos resultados se concluye lo siguiente:

- Las estaciones existentes y proyectadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB tienen un cubrimiento importante de la zona occidental de la ciudad, por lo cual la metodología aplicada no encuentra la necesidad de localizar estaciones en esta zona.

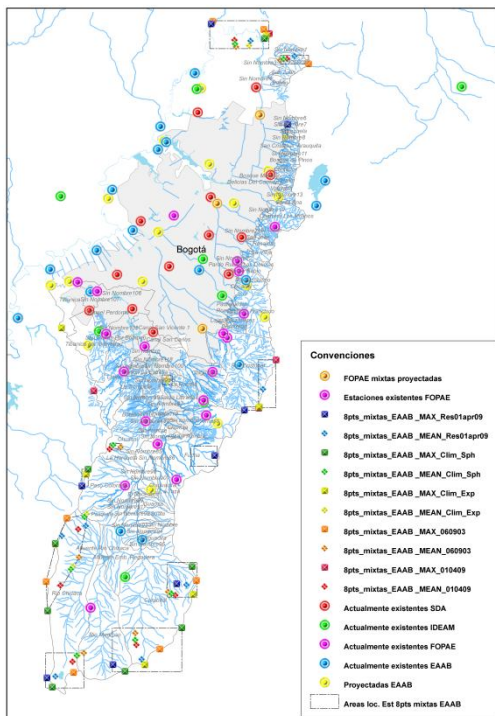


Figura 22. 8 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas

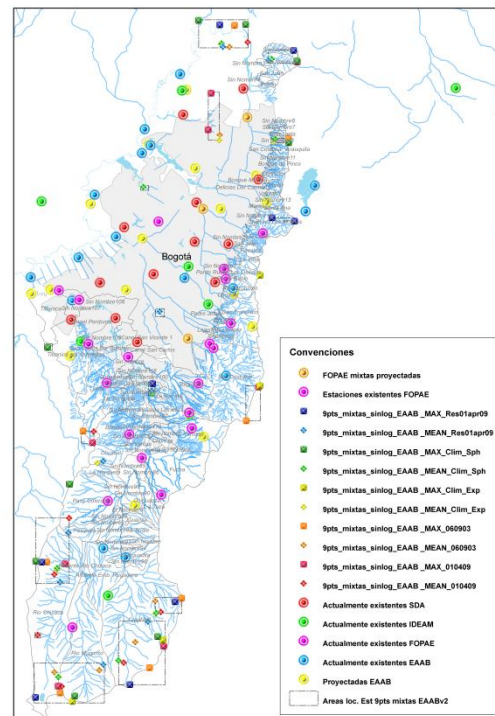


Figura 23. 9 Puntos de localización de estaciones adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y mixtas FOPAE proyectadas

- La ubicación óptima obtenida mediante los diferentes variograma muestra zonas bien delimitadas.
- Cuando se utiliza el criterio de minimización de la varianza máxima se obtienen recurrentemente posiciones de estaciones adicionales localizadas en el extremo del área de estudio dado que el algoritmo reduce la posibilidad de tener ubicaciones en el área de estudio que estén pobremente monitoreadas. En el caso de la varianza media los puntos se distribuyen más uniformemente en el área de estudio (Rossiter, 2010).
- De las dos figuras se concluye que serían necesarias entre tres y cuatro estaciones en la cuenca alta del río Tunjuelo.
- Se identifica que se requiere una estación adicional en la parte alta de la cuenca del río San Cristobal.
- Cuando se considera la posibilidad de localizar 9 estaciones, en la zona central de la ciudad se requeriría otra estación en la cuenca del río Fucha.
- Se identifica la necesidad de localización de una estación en la cuenca alta de la quebrada Limas.
- Se identifica la necesidad de una estación en la parte oriental del humedal Jaboque cuando se consideran 9 estaciones.
- En la zona norte de la ciudad es donde más necesidad de estaciones se identifica siendo necesarias entre 5 y 6 estaciones. Es posible identificar la necesidad de una estación en la zona del Cerro de Suba, una estación en la zona del humedal Guaymaral y tres estaciones localizadas en las cuencas de los Cerros Orientales.

5.3.6 Definición de áreas para localización de estaciones

Utilizando los resultados de los diferentes escenarios obtenidos, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos para las recomendaciones finales:

- Se considerará la posibilidad de localización de nueve estaciones teniendo en cuenta la recomendación de IDEAM (2006).
- Se tendrán en cuenta los resultados obtenidos cuando se utilizaron las estaciones mixtas proyectadas del FOPAE.
- Se tomarán como más representativos los resultados de puntos de localización obtenidos mediante el uso del variograma climatológico esférico y exponencial considerando la minimización de la varianza media.
- Se definirán nueve zonas prioritarias para localización con base en los resultados de las simulaciones realizadas, siendo el punto o puntos (en la mayoría de los casos los puntos son coincidentes) obtenidos mediante las simulaciones con el variograma climatológico esférico y exponencial la localización considerada óptima. Dado que se considera de alta dificultad que la estación sea localizada exactamente en el punto obtenida mediante "Simulated Annealing" se proponen áreas en donde las simulaciones muestran optimalidad para que las estaciones sean localizadas dentro de las mismas.

Los resultados del análisis se muestran en la Figura 24 y la Figura 25, el detalle de cada área identificada se aborda a continuación.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

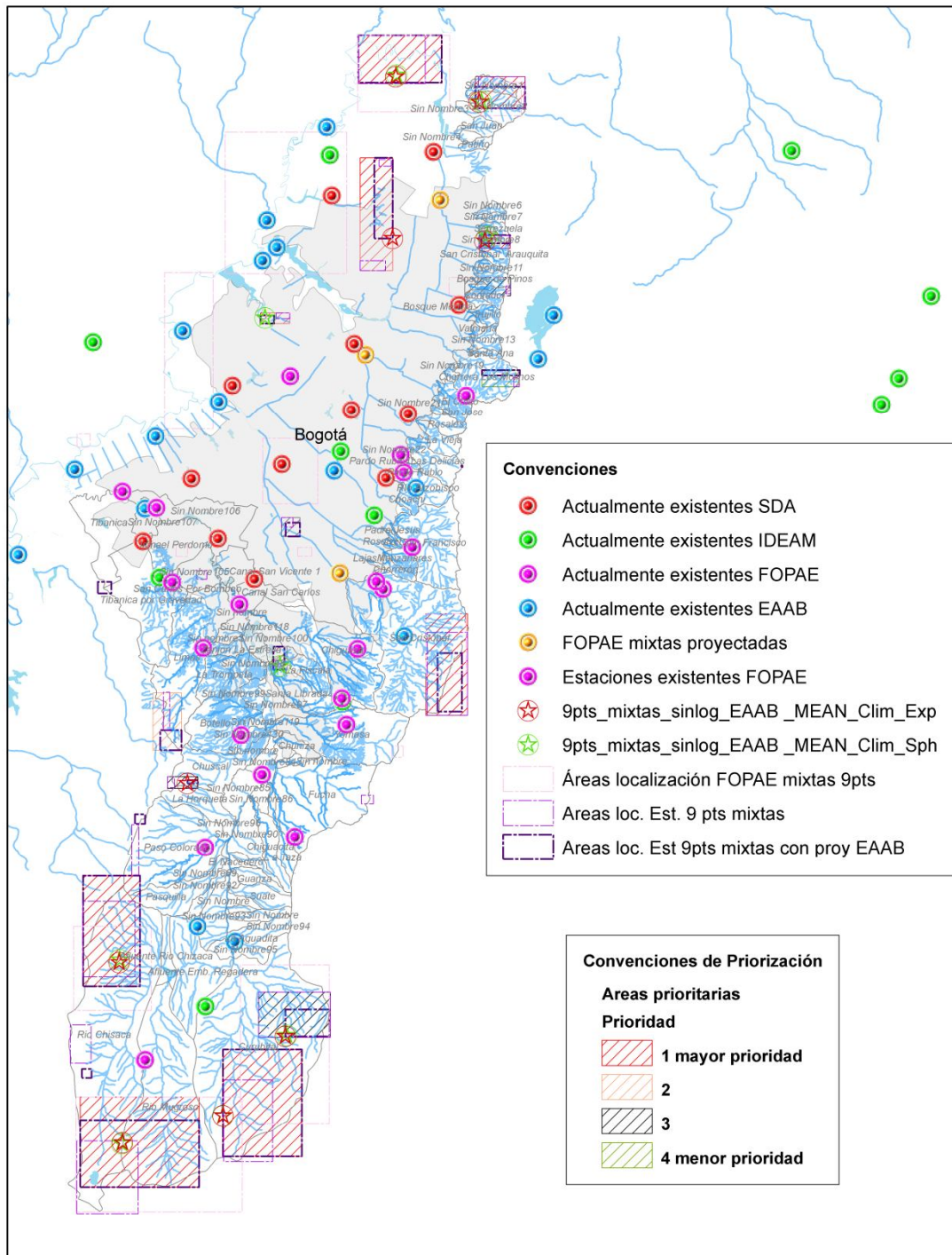


Figura 24. Análisis de áreas de localización y prioridad asignada

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA

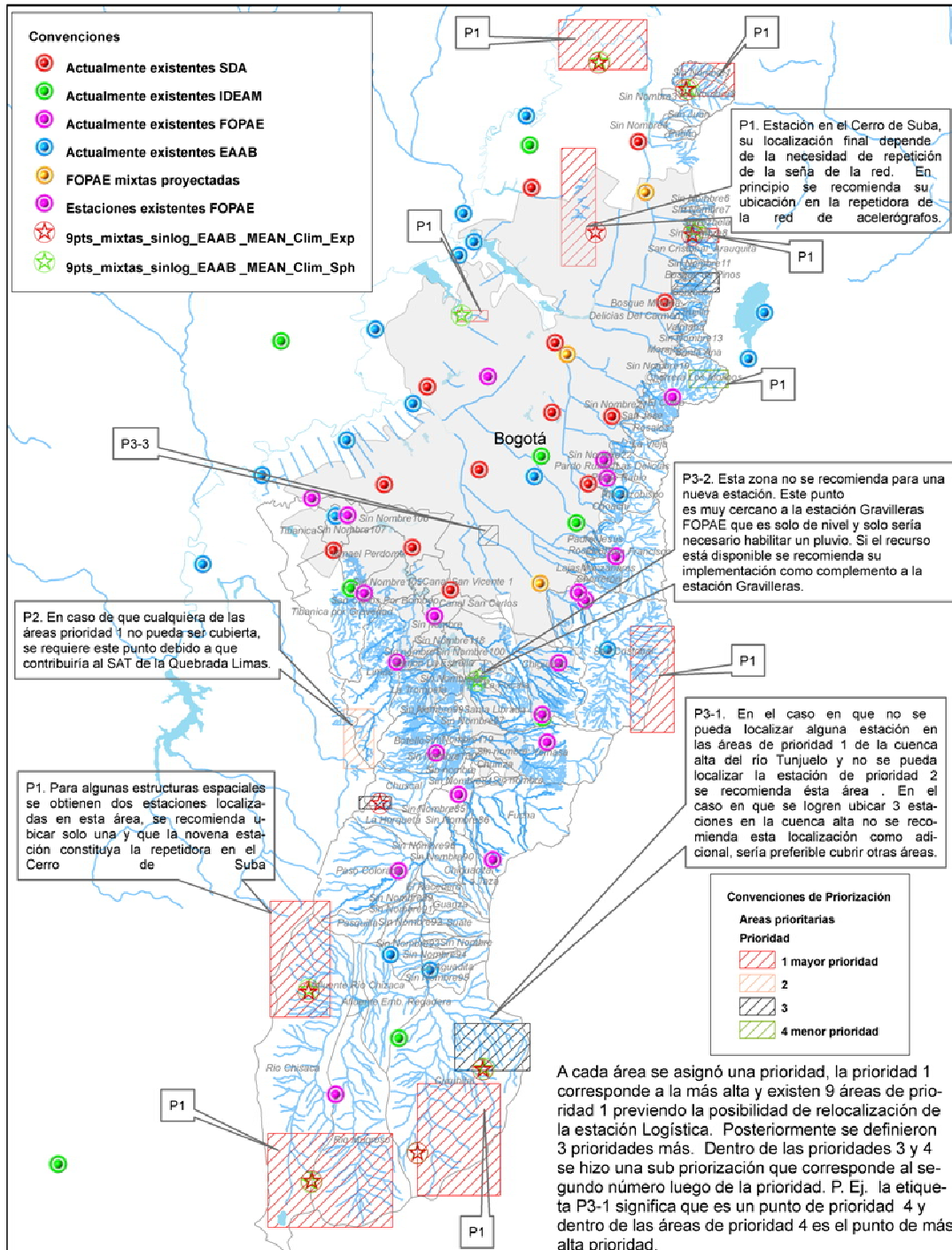


Figura 25. Priorización detallada de áreas de localización



✓ CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO

En la cuenca alta del río Tunjuelo la metodología utilizada identificó 3 áreas de primera prioridad y una de tercera (ver Figura 26). La optimización por “Simulated annealing” utilizando los variogramas exponencial y esférico localizó 4 estaciones en esta zona. Los resultados obtenidos mediante la utilización de los dos variogramas son prácticamente iguales indicando que existen 4 puntos óptimos en la cuenca alta que reducen eficientemente la varianza media del área de estudio. Dada que esta es una zona rural lo cual genera dificultades para la localización de estaciones especialmente en la zona 4, ésta última se dejó como de prioridad 3.

En el caso de la zona A al verificar la imagen satelital se encontró que en el lugar de localización óptima según los variogramas esférico y exponencial, existen algunas viviendas (ver Figura 27) en donde se recomienda gestionar el emplazamiento de la estación.

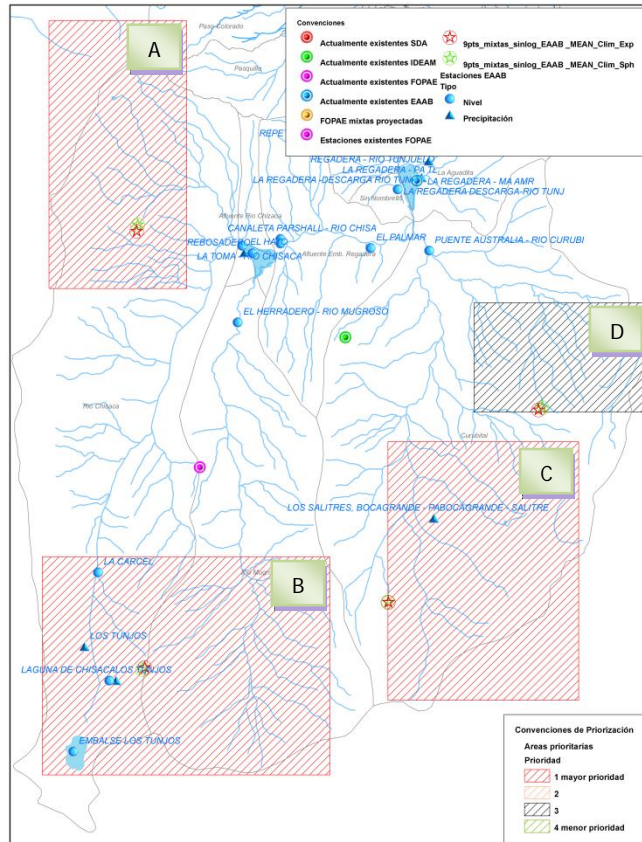


Figura 26. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca alta del río Tunjuelo

En la zona B se identificaron varias estaciones convencionales pertenecientes a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB en la zona aledaña al punto óptimo de localización encontrado tanto con el variograma esférico como con el exponencial:

- ✓ 3 limnímetros: Embalse Los Tunjos, Los Tunjos y La Cárcel.
- ✓ 2 Pluviómetros: Laguna de Chisacá y Los Tunjos. La estación Laguna de Chisacá no contiene datos en el Sistema de Información Hidrológica –SIH de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB.

Por lo anterior se recomienda verificar si en alguno de estos puntos es posible realizar el emplazamiento de la estación con el fin de que se tengan condiciones de seguridad adecuadas. En caso de que se pueda localizar en alguno de los sitios en donde existen pluviómetros de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB estos podrían ser utilizados para validación de datos.

Para la zona C se encontró que en la zona priorizada se encuentra la estación convencional Bocagrande Salitre de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB, la cual se recomienda sea revisada para determinar si puede constituir el punto de emplazamiento de la estación telemétrica.



Figura 27. Viviendas identificadas en la zona de localización óptima según variogramas exponencial y esférico en la zona A de la cuenca alta del río Tunjuelo

Para el caso de la zona D solo se encontró en la imagen satelital una construcción localizada en el borde norte de la zona definida. Se recomienda que en caso de que no se puedan localizar 3 estaciones en la cuenca alta y tampoco se pueda localizar la estación de la cuenca alta de la quebrada Limas se evalúe si es posible localizar una estación en este punto.

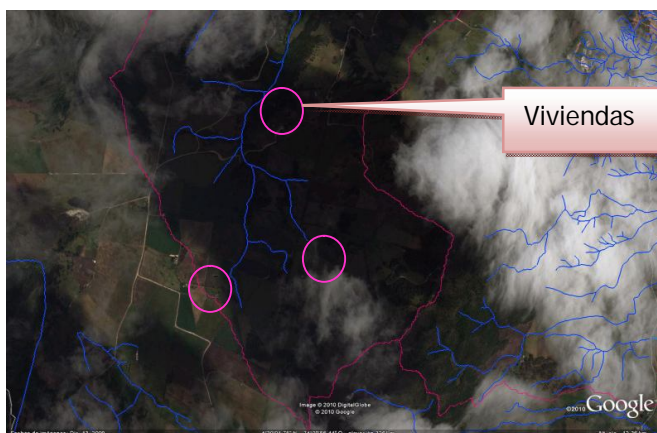


Figura 28. Viviendas identificadas en la Cuenca alta de la quebrada Limas

✓ CUENCA MEDIA DEL RÍO
TUNJUELO

En la cuenca media del río Tunjuelo no se localizaron estaciones con prioridad 1 a pesar de que los puntos obtenidos mediante el uso de los variogramas esférico y exponencial se encuentran localizadas en dos de las áreas identificadas (ver Figura 29).

ZONA E: Corresponde a la cuenca alta de la quebrada Limas. Esta área se obtuvo de simulaciones

que incluyan las estaciones FOPAE junto con las estaciones FOPAE mixtas proyectadas solamente y con las estaciones existentes de todas las entidades. Debido a que se ha identificado que para el Sistema de Alerta Temprana de la Quebrada Limas es de utilidad contar con datos en tiempo real en la cuenca alta, esta zona se clasificó como de prioridad 2, es decir, en caso de que en cualquiera de las áreas definidas como de prioridad 1 no sea posible la instalación de la estación se recomienda que se evalúe esta área. Aunque esta zona es rural, de la imagen satelital se identifica que existen algunas viviendas en donde sería posible investigar la factibilidad del emplazamiento de la estación (ver Figura 28).

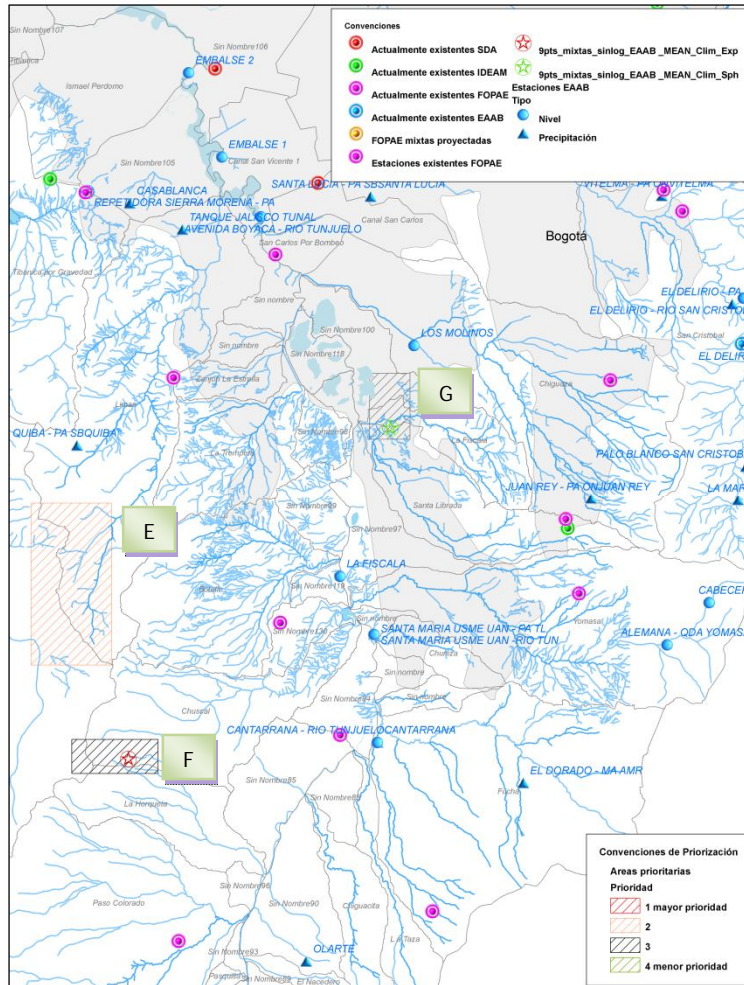


Figura 29. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca alta del río Tunjuelo

En caso de que no sea posible localizar la estación en la cuenca alta de la quebrada Limas se recomienda la evaluación de este punto. No fue posible verificar la imagen satelital por presencia de nubes en la zona.

En la ZONA G se localiza un punto óptimo del variograma esférico, sin embargo se considera que la mejor opción para cubrir esta zona es la instalación de un pluviómetro para la estación Gravilleras que se localiza en la zona de Pits, lo cual cubriría adecuadamente esta zona sin necesidad de la instalación de otra estación.

el Sistema de Alerta Temprana de la Quebrada Limas es de utilidad contar con datos en tiempo real en la cuenca alta, esta zona se clasificó como de prioridad 2, es decir, en caso de que en cualquiera de las áreas definidas como de prioridad 1 no sea posible la instalación de la estación se recomienda que se evalúe esta área. Aunque esta zona es rural, de la imagen satelital se identifica que existen algunas viviendas en donde sería posible investigar la factibilidad del emplazamiento de la estación (ver Figura 28).

ZONA F: a pesar de que en esta zona se localiza un punto óptimo correspondiente a la simulación con el variograma climatológico exponencial, su prioridad se redujo debido a la necesidad de localizar una estación en la cuenca alta de la quebrada Limas lo que conduciría a

que las dos estaciones quedaran muy cercanas. En

caso de que no sea posible localizar la estación en la cuenca alta de la quebrada Limas se recomienda la evaluación de este punto. No fue posible verificar la imagen satelital por presencia de nubes en la zona.

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA



✓ CUENCA DEL RÍO FUCHA

En la cuenca del río Fucha la metodología no localizó puntos óptimos pertenecientes a los variogramas esférico y exponencial (ver Figura 30) sin embargo en la zona más alta de la cuenca del río San Cristobal (ZONA H) repetitivamente las simulaciones con otros variogramas y escenarios mostraban la necesidad de una estación lo mismo que las recomendaciones generadas por UNAL (2006) y por IDEAM (2007) por lo cual se le asignó prioridad 1. La ZONA H corresponde a una zona de reserva y es muy posible que se dificulte la localización de una estación en ésta área, además es importante tener en cuenta que lo más conveniente sería localizar la estación lo más alejada posible de la estación El Delirio. Dado lo anterior se recomienda que si en el área H no se encuentra una zona de emplazamiento adecuada, se siga la recomendación de la UNAL (2006) de instalar el equipo telemétrico en la estación La María que se encuentra suspendida desde el año 1996 y que pertenece a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB.

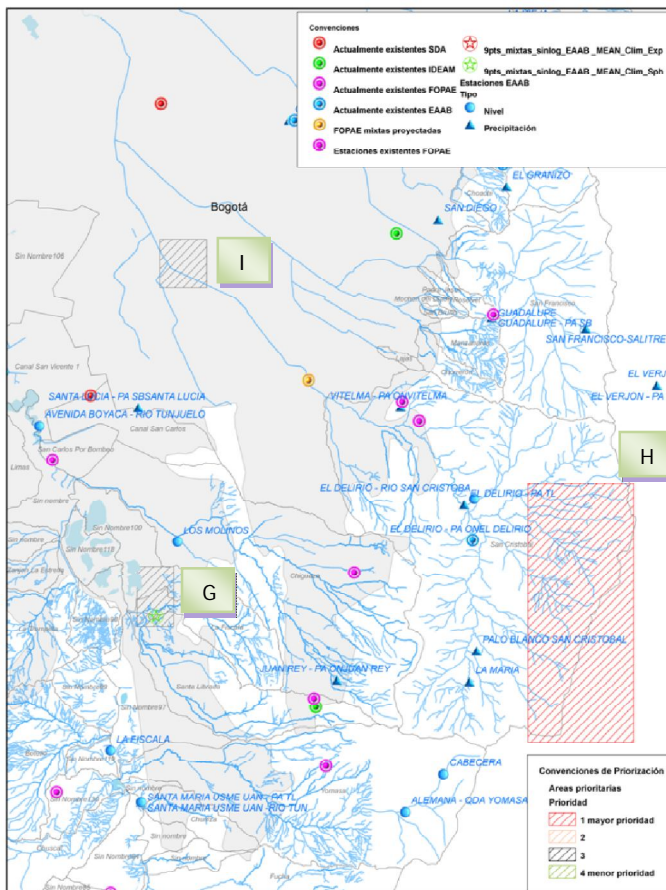


Figura 30. Zonas de localización de estaciones en la Cuenca del río Fucha

La ZONA I fue identificada de simulaciones que incluían las estaciones FOPAE junto con las estaciones FOPAE mixtas proyectadas solamente y con las estaciones existentes de todas las entidades. Constituye un área urbana en donde incluso se encuentra un complejo deportivo en donde podría investigarse la posibilidad de emplazamiento o en algún edificio institucional del área (ver Figura 31).

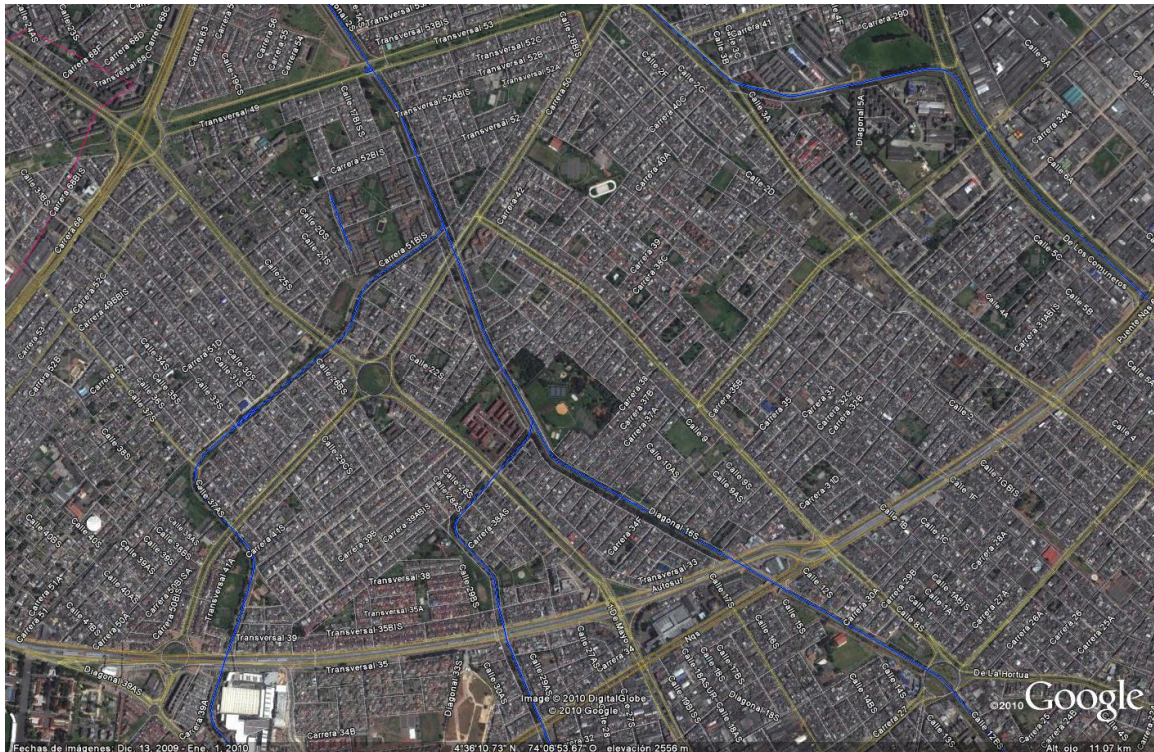


Figura 31. Imagen satelital de la zona I

✓ **ZONA NORTE**

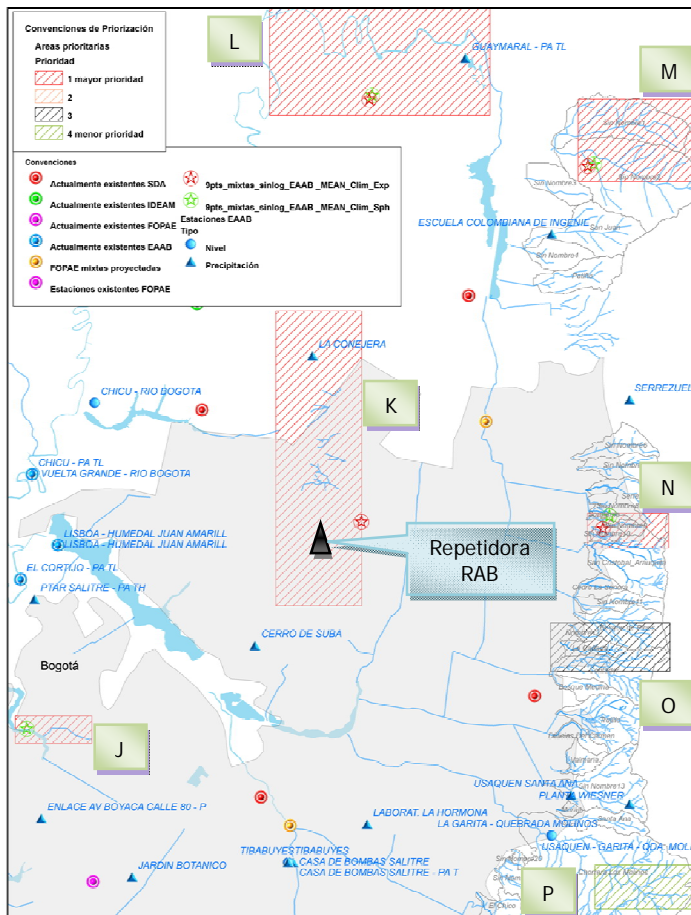
En esta zona se identificaron cinco zonas con prioridad 1, una con prioridad 3 y una con prioridad 4 (ver Figura 33).

ZONA J: Corresponde a la zona de inicio del humedal Jaboque y el canal Carmelo. Allí se ubicó uno de los puntos óptimos utilizando el variograma esférico. Corresponde a una zona urbana en donde en la margen derecha del canal Carmelo se localiza un parque donde podría investigarse la posibilidad de emplazamiento o en algún edificio institucional del área (ver Figura 32).



Figura 32. Imagen satelital de la zona J

LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL FOPAE A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN GEOESTADÍSTICA



ZONA K: Ésta zona corresponde al Cerro de Suba, en ella se localiza un punto óptimo obtenido mediante la simulación con el variograma climatológico exponencial. De acuerdo con los criterios electrónicos a nivel de transmisión es necesaria la instalación de una repetidora en esta área para transmitir los datos de la zona norte de la ciudad al receptor ubicado en el FOPAE. En el Cerro de Suba se encuentra la repetidora de la red de acelerógrafos del FOPAE por lo cual se recomienda que la estación de la zona K, que actuará como repetidora, se ubique en este punto.

ZONA L: Corresponde a la zona más al norte de la ciudad de Bogotá. En la confluencia del Humedal Guaymaral y el río Bogotá la Empresa de Acueducto y Alcantarillado – EAAB realizó la instalación de una estación automática telemétrica pero en el Sistema de Información Hidrológica de la Empresa esta estación se encuentra sin datos

Figura 33. Zonas de localización de estaciones en la zona norte de la ciudad

por lo cual no se tuvo en cuenta para realizar los análisis, sin embargo se recomienda que la estación FOPAE adicional se localice alejada de la estación Guaymaral – EAAB y en lo más cercana posible a los puntos óptimos encontrados mediante simulación utilizando los variogramas exponencial y esférico como se muestra en la Figura 33. Esta es una zona en donde se encuentran conjuntos residenciales y establecimientos educativos en donde puede explorarse la posibilidad del emplazamiento de la estación (ver Figura 34).

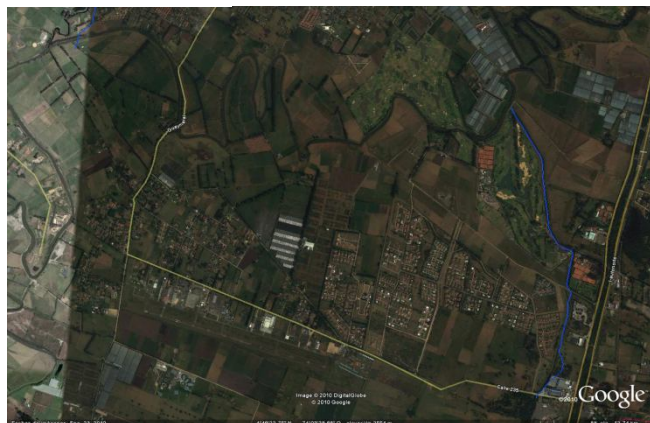


Figura 34. Imagen satelital zona L

ZONA M: Corresponde a las dos cuencas de los Cerros Orientales localizadas más al norte de Bogotá. Especialmente la cuenca localizada más al sur tiene zonas urbanas en donde se recomienda buscar edificios institucionales en donde sea posible realizar el emplazamiento de la estación (ver Figura 35). Adicionalmente, se recomienda tratar de realizar su ubicación lo más cerca posible al punto óptimo identificado mediante el uso tanto del variograma esférico como exponencial (ver Figura 33).



Figura 35. Imagen satelital zona M

ZONA N: Cubre desde la cuenca Soratama hasta la cuenca de la quebrada Arauquita-San Cristobal. Especialmente la cuenca de la quebrada Soratama se encuentra bastante urbanizada por lo cual se recomienda buscar edificios institucionales en donde sea posible realizar el emplazamiento de la estación (ver Figura 36). Adicionalmente, se recomienda tratar de realizar su ubicación lo más cerca posible al punto óptimo identificado mediante el uso tanto del variograma esférico como exponencial.



Figura 36. Imagen satelital zona N

ZONA O: Cubre desde la cuenca de la quebrada Bosque de Pinos, hasta la cuenca de la quebrada Contador. En esta zona no se encuentra ningún punto óptimo de los variogramas esférico y exponencial, pero simulaciones en las que se incluían las estaciones FOPAE junto con las estaciones FOPAE mixtas proyectadas solamente y con las estaciones existentes de todas las entidades mostraron esta zona como óptima por lo cual se ha recomendado con prioridad

3. En la zona cercana a la carrera 7 las cuencas parecen tener un grado de urbanización importante por lo tanto en ésta área sería posible identificar alguna construcción en donde fuera posible instalar la estación.

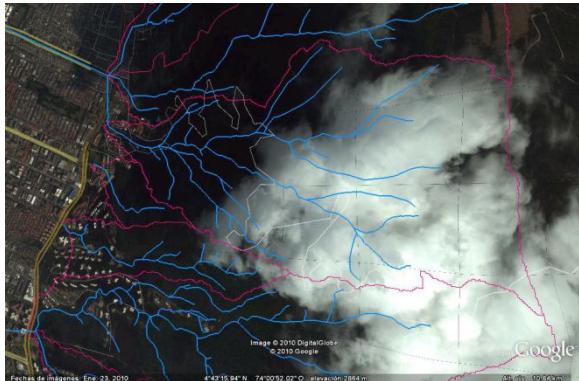


Figura 37. Imagen satelital zona O

ZONA P: Constituye la zona con más baja prioridad y se localiza en la cuenca alta de la quebrada La Chorrera. Corresponde a una zona identificada de puntos óptimos para reducción de la varianza máxima con simulaciones en las que se incluían todas las estaciones existentes de todas las entidades y las anteriores junto con las proyectadas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB.

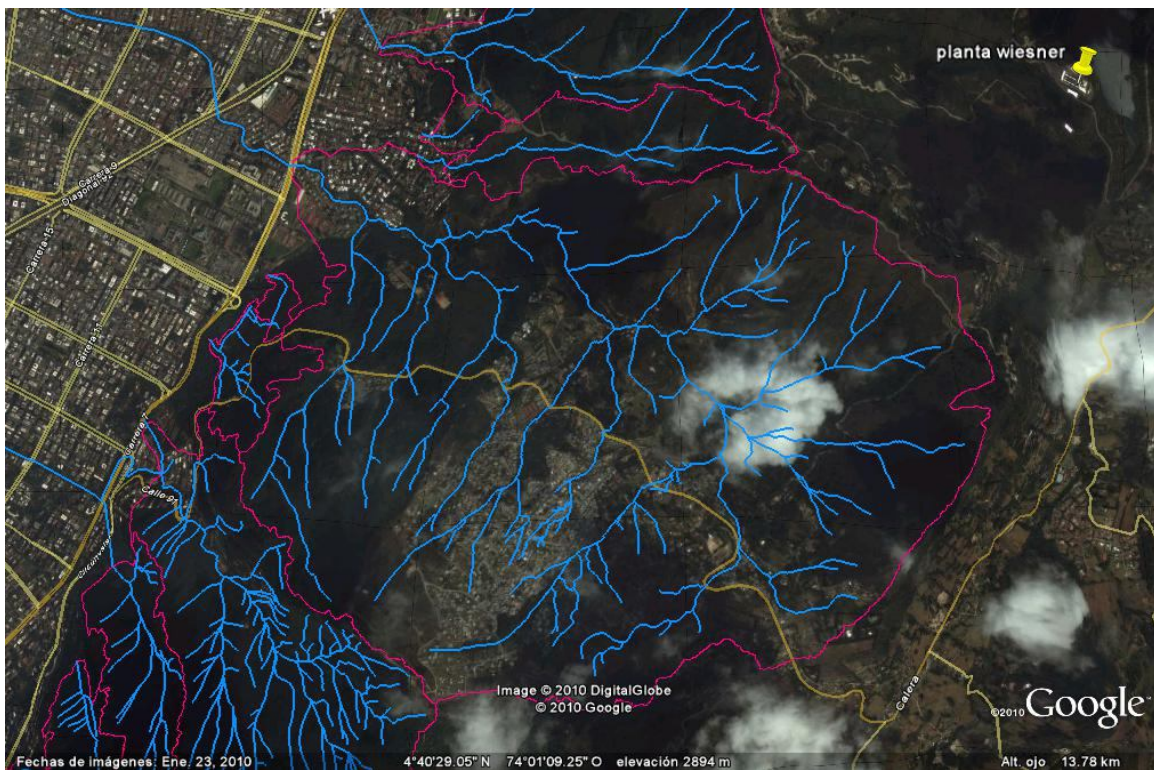


Figura 38. Imagen satelital zona P

6 CONCLUSIONES

- Luego del análisis realizado la localización de estaciones mixtas recomendada corresponde a la Figura 6.
- Se identificaron inconvenientes de medición en la estación Gravilleras y por lo tanto se planteó la alternativa de relocalizarla para mejorar la medición de niveles y caudales.
- La metodología aplicada para determinar la localización óptima de las estaciones adicionales FOPAE condujo a buenos resultados, siendo posible la identificación clara de áreas en donde se requieren estaciones que optimizan la varianza media del campo de precipitación sobre el área de estudio.
- El uso de variogramas diferentes en el área de estudio condujo a la determinación de áreas que pueden ser utilizadas para la localización y mostraron concentración de los puntos óptimos a pesar de la diferencia en la estructura espacial considerada.
- Las áreas recomendadas y su correspondiente priorización corresponden a la Figura 25.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la localización especificada en este documento se tome como un indicador a la luz de las metodologías utilizadas pero que se tengan en cuenta aspectos como la seguridad primordialmente en la localización de las estaciones. En el caso de las estaciones hidrométricas es necesario que adicionalmente se determine en campo la factibilidad de su localización de acuerdo a un criterio hidráulico que permita la medición de niveles y caudales de forma adecuada.
- Se recomienda reconsiderar la localización de la estación Gravilleras, evaluando la posibilidad de mover el sensor a la rápida de CEMEX para lo cual se recomienda que se evalúe el futuro a corto plazo de la rápida con el fin de concluir sobre la factibilidad de realizar el cambio y que se lleven a cabo todos los estudios en campo y a nivel electrónico.
- Es de gran importancia que todas las estaciones de nivel cuenten con un amarre topográfico adecuado de alta precisión, que su nivel sea proporcionado en metros sobre el nivel del mar y que cuente con una curva de calibración adecuada para la estimación de caudal para lo cual es necesario que se lleven a procesos de aforo.
- Se reitera la necesidad como fue expresada por la Universidad Nacional en su estudio "Análisis e Investigación de procesos de Avenidas Torrenciales como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristobal", de contar con participación comunitaria, orientada a la operación de los sistemas de alerta y complemento de información hidrometeorológica. Se recomienda que se evalúe a nivel comunitario la factibilidad y pertinencia de implementar el sistema de monitoreo comunitario recomendado por la Universidad Nacional para la cuenca alta del río San Cristobal.
- Se recomienda que se cuente con los mecanismos de respaldo para la toma de datos en los puntos de medición, es decir, que se cuente con la contingencia necesaria en caso de que alguno de los sensores salga de operación o en caso de que el sistema telemétrico no se encuentre operativo. Esto es, se debe contar con los instrumentos convencionales

- en campo que no solo permiten la validación de los datos de los sensores sino que en caso de alguna falla de operación se pueda contar con el dato con el apoyo de observadores.
- De acuerdo con la información recopilada por el IDEAM (2007) en la avenida 68 con río Juan Amarillo y en el Canal Torca ya existen instaladas miras que pertenecen a la Secretaría de Ambiente, por lo tanto se recomienda que si tales miras se encuentran operativas, el sistema telemétrico se integre a estas miras para que constituyan su sistema de respaldo y verificación.
 - Una de las prioridades de los sistemas de alerta del Distrito es el río Bogotá. Dado que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB cuenta con un sistema de monitoreo de este río con un gran número de estaciones, no se consideraron estaciones de nivel pertenecientes al FOPAE en el río Bogotá. Sin embargo, es de alta prioridad, que los datos registrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB sean recibidos por el FOPAE e ingresados al SIRE (Sistema de Información de Riesgos y Emergencias) en tiempo real y de manera eficiente, para que de esta forma puedan ser utilizados en el sistema de alerta temprana del río Bogotá. Para lo anterior se recomienda que se realicen las gestiones pertinentes para la integración de las redes de las dos entidades.
 - Al considerar las estaciones telemétricas de precipitación existentes en el Distrito (ver Figura 12) se observa que existe una gran cantidad de equipos instalados, algunos incluso localizados en el mismo emplazamiento de otra estación. Se recomienda que se establezcan los mecanismos necesarios para que la información hidrometeorológica de las diferentes entidades del Distrito se integre de manera eficiente. Para el FOPAE es crucial tener acceso en tiempo real a los datos de las otras entidades dado que es la única forma en la cual puede obtenerse una estimación del campo de precipitación en las diferentes áreas de la ciudad de una manera técnica y económicamente eficiente. Se recomienda que se establezcan los convenios o acuerdos que se requieran para que los datos sean compartidos de manera adecuada y que se establezcan los medios tecnológicos más eficientes y económicos para realizar este intercambio de datos.
 - Los aspectos relacionados con cada área específica identificada para la localización de estaciones se encuentra en la sección 5.3.6, se recomienda que todos los aspectos allí incluidos sean tenidos en cuenta para la localización de las estaciones.
 - Se recomienda que se establezcan los mecanismos de validación de los datos de la red hidrometeorológica que conduzcan a la evaluación de la integridad de los datos. Esto con el fin de que los datos puedan ser usados al interior del FOPAE con un alto nivel de confiabilidad lo mismo que al exterior de la entidad. Datos que no son inexactos e inconsistentes pueden degradar de manera significativa los procesos de pronóstico de los sistemas de alerta temprana de inundaciones, por lo cual el control de calidad es crucial. Se recomienda el uso de “flags” o indicadores para los datos dentro de la base de datos del SIRE (Sistema de Información de Riesgos y Emergencias) de tal forma que datos problemáticos puedan ser identificados por todos los usuarios.
 - Se recomienda que se establezca una codificación estándar para la estaciones, es decir un identificador único, que pueda ser utilizado tanto al interior del FOPAE como por las otras entidades.

BIBLIOGRAFIA

- Barca, E., et al. (2008). "Optimal extension of the rain gauge monitoring network of the Apulian Regional Consortium for Crop Protection." Environmental Monitoring and Assessment **145**(1): 375-386.
- Bastin, G., et al. (1984). "Optimal Estimation of the Average Areal Rainfall and Optimal Selection of Rain Gauge Locations." Water Resour. Res. **20**(4): 463-470.
- Bras, R. L. and I. Rodríguez-Iturbe (1976). "Rainfall Network Design for Runoff Prediction." Water Resour. Res. **12**(6): 1197-1208.
- Chiles, J.-P. and P. Delfiner, Eds. (1999). Geostatistics: modelling spatial uncertainty. SERIES IN PROBABILITY AND STATISTICS APPLIED PROBABILITY AND STATISTICS SECTION. New York.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York.
- Lebel, T. and G. Bastin (1985). "Variogram identification by the mean-squared interpolation error method with application to hydrologic fields." Journal of Hydrology **77**(1-4): 31-56.
- Pardo-Igúzquiza, E. (1998). "Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing." Journal of Hydrology **210**(1-4): 206-220.
- Rossiter, D. G. (2010). "Lecture notes."

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2007) "DISEÑO Y AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO"

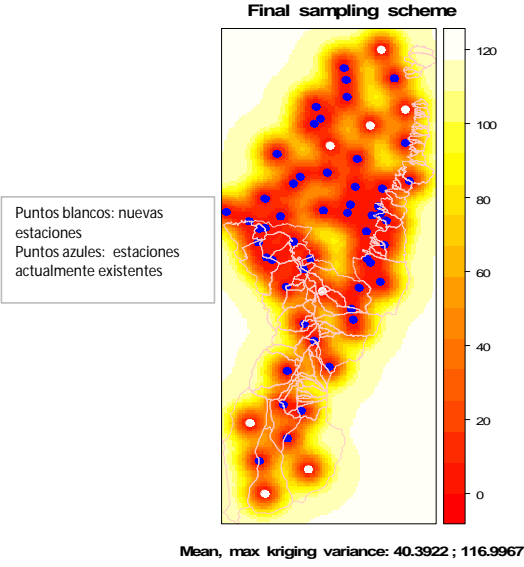
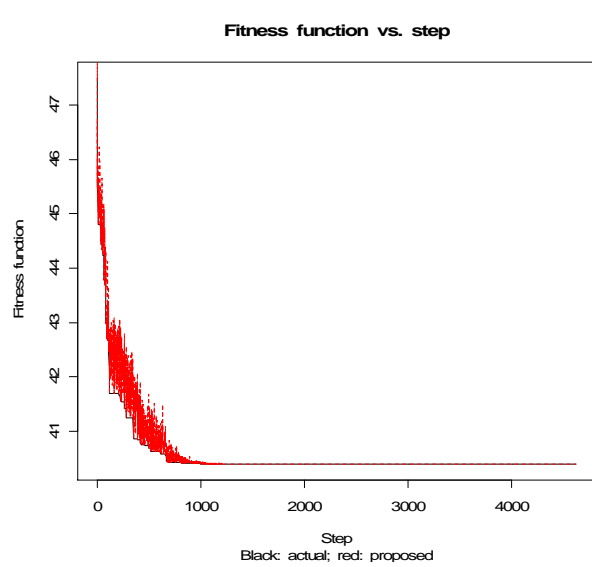
Universidad Nacional de Colombia – UNAL (2006), "ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN DE PROCESOS DE AVENIDAS TORRENCIALES COMO EVENTOS GENERADORES DE RIESGO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAN CRISTOBAL", Estudio contratado por el FOPAE.

ANEXO A. RESULTADOS DE “SIMULATED ANNEALING” PARA TODOS LOS ESCENARIOS CONSIDERADOS

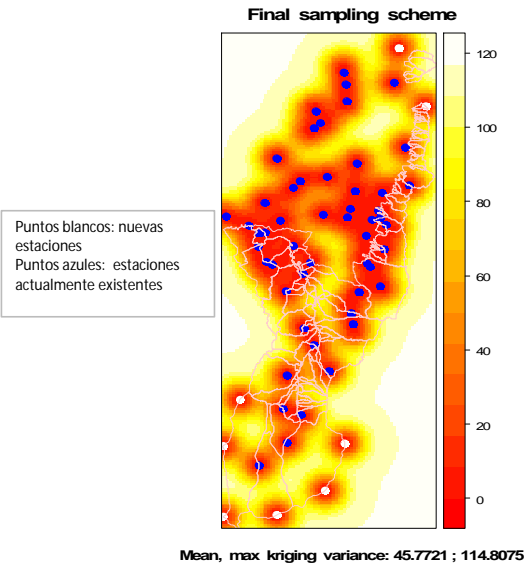
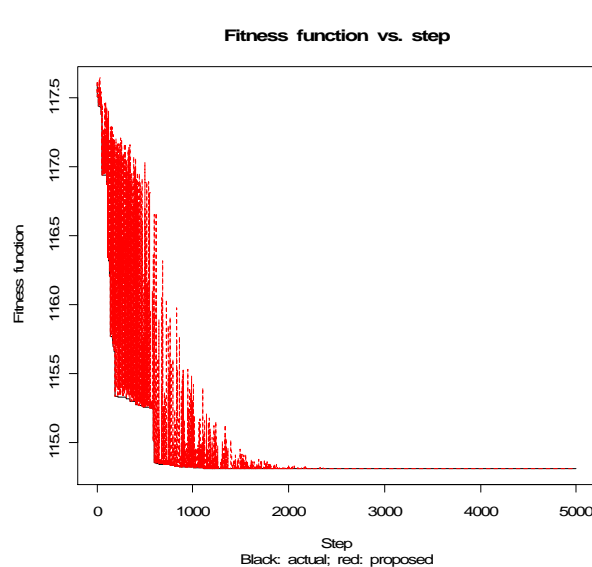
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



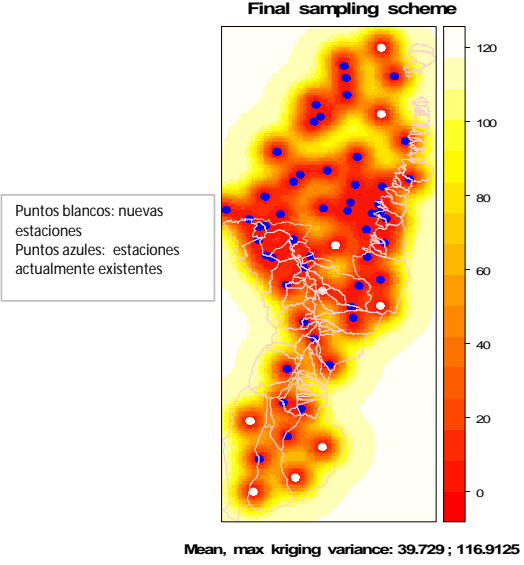
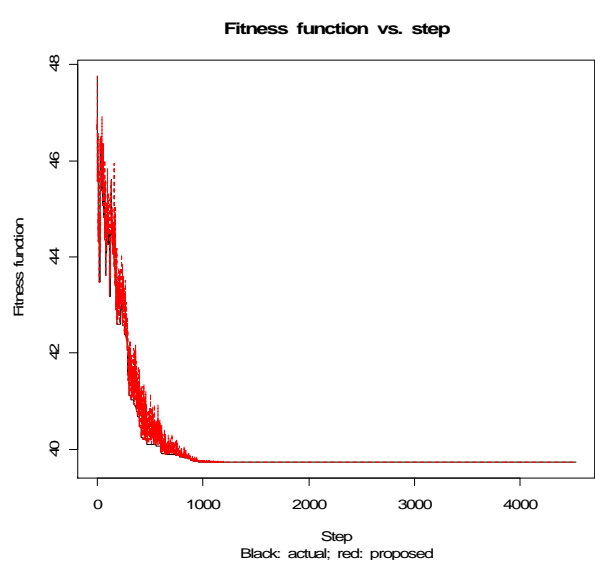
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



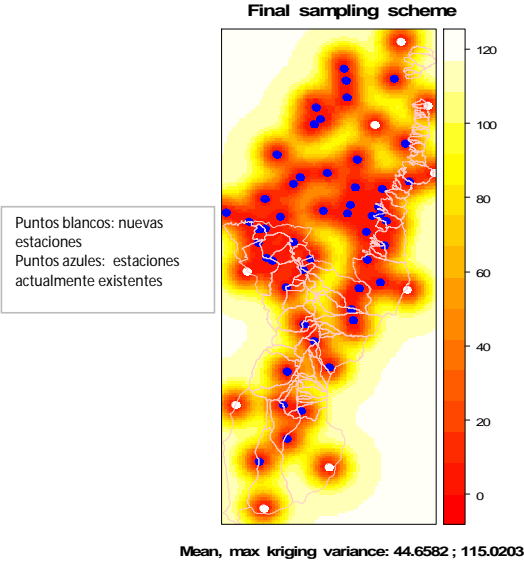
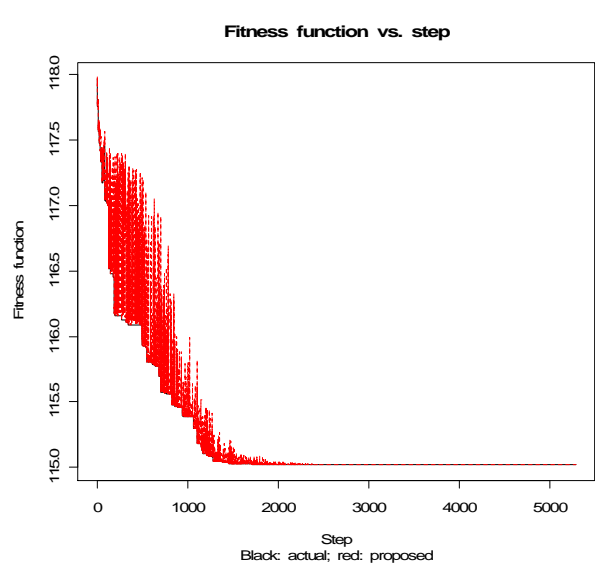
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



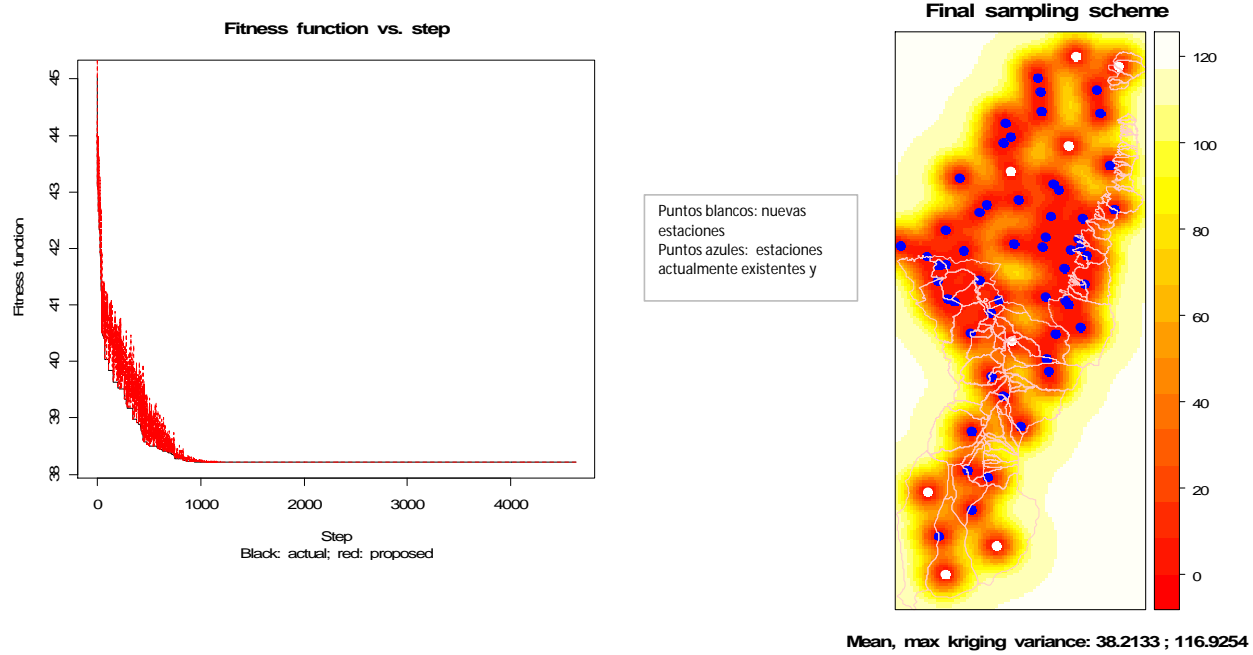
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



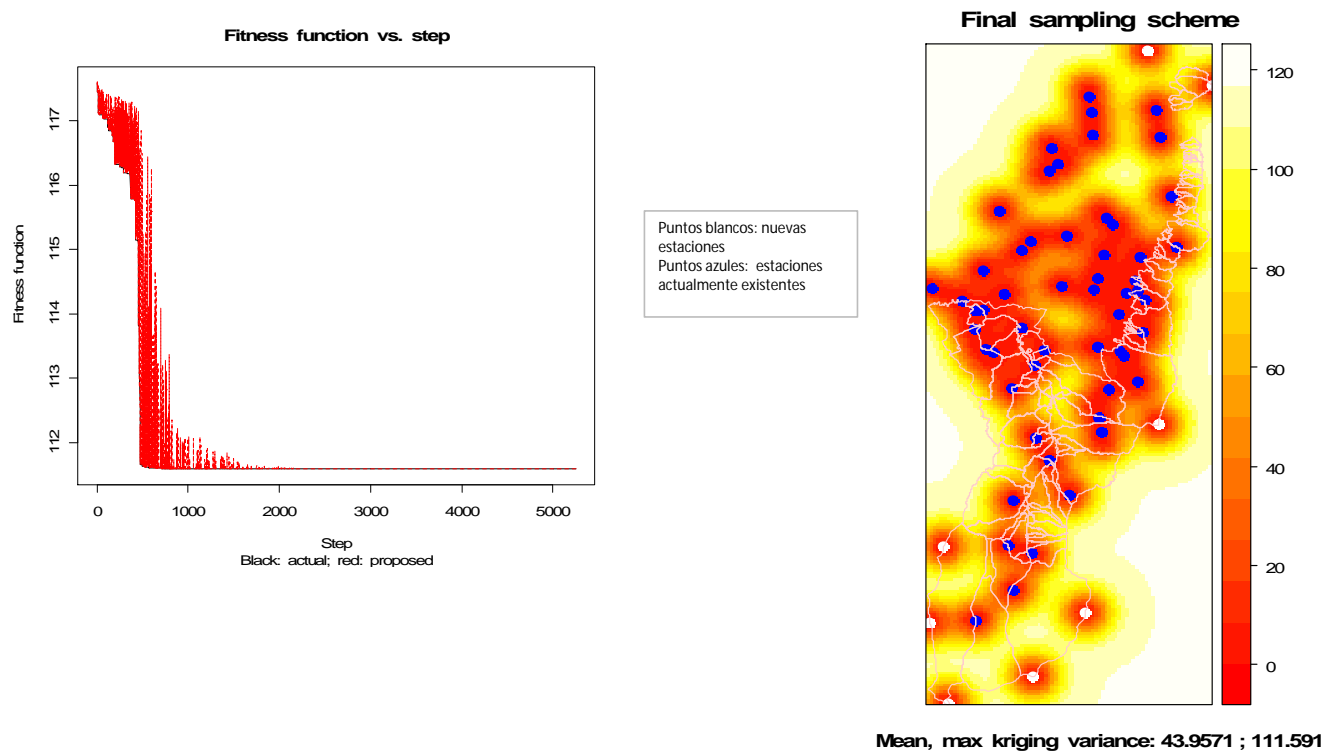
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



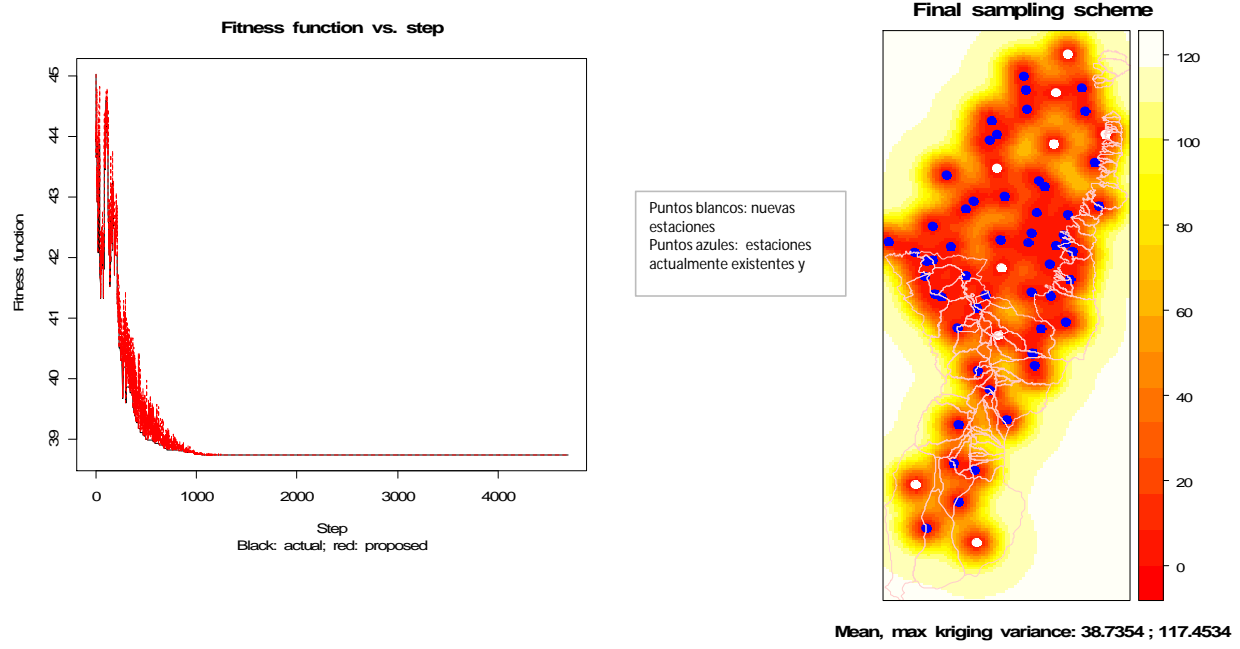
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



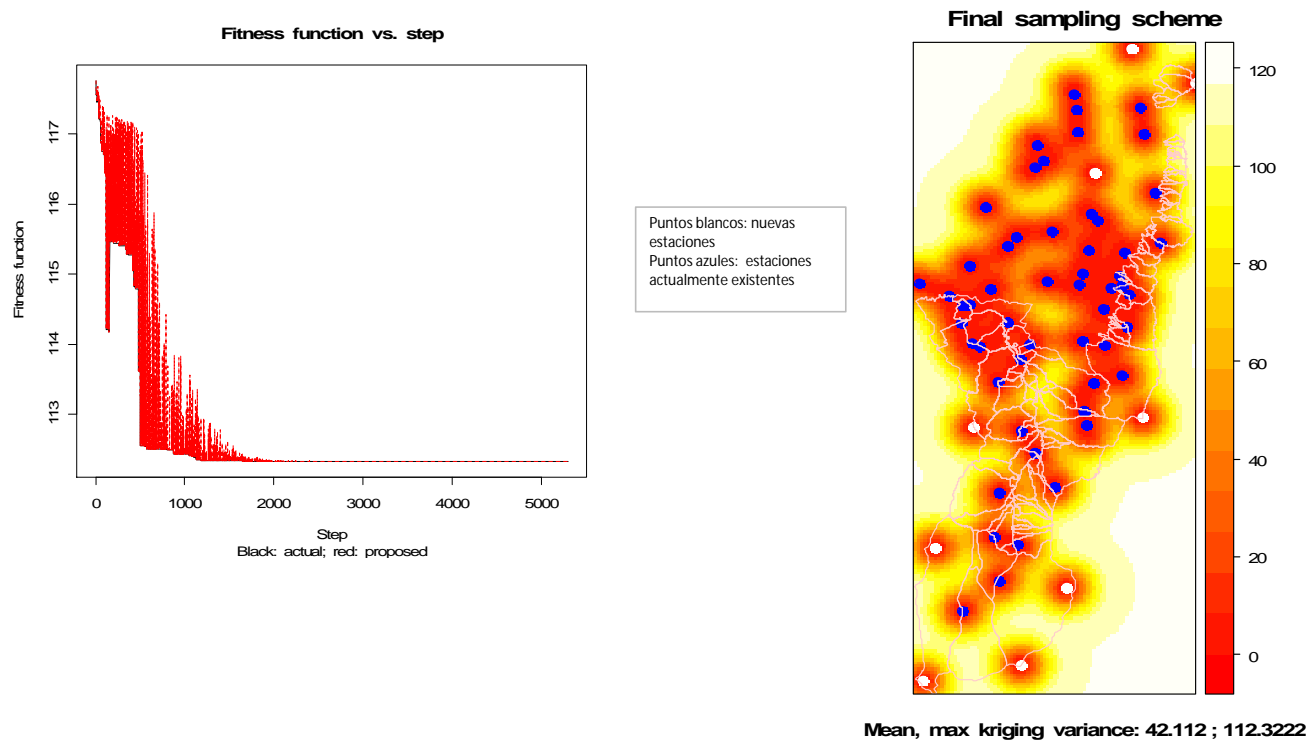
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

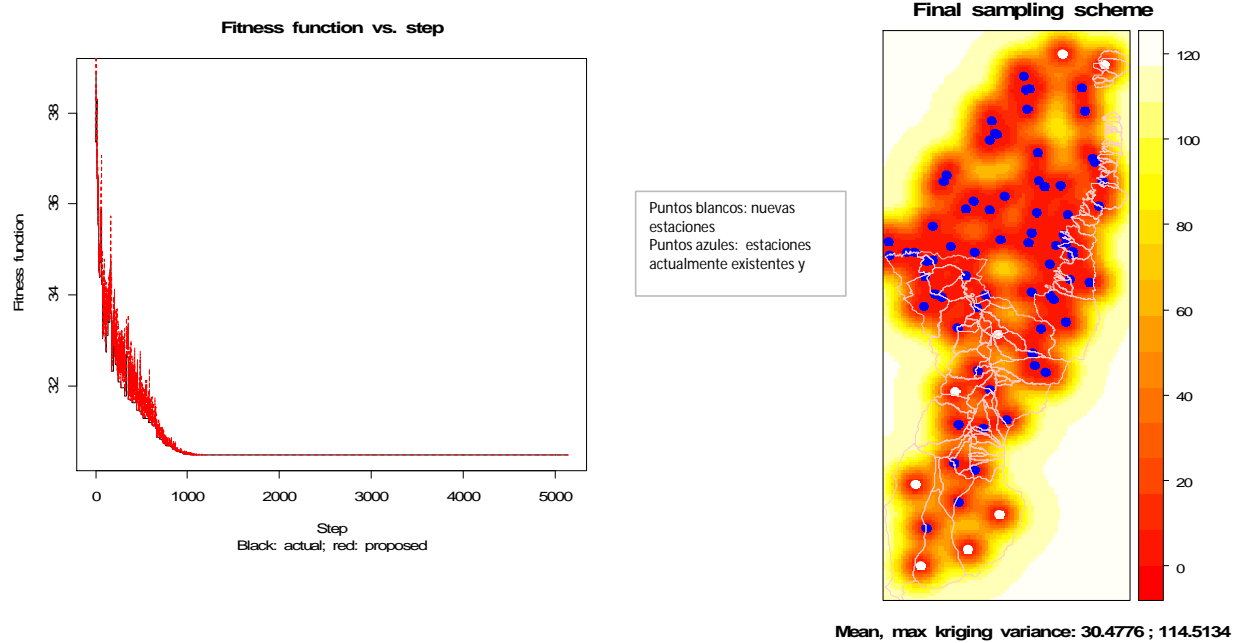


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

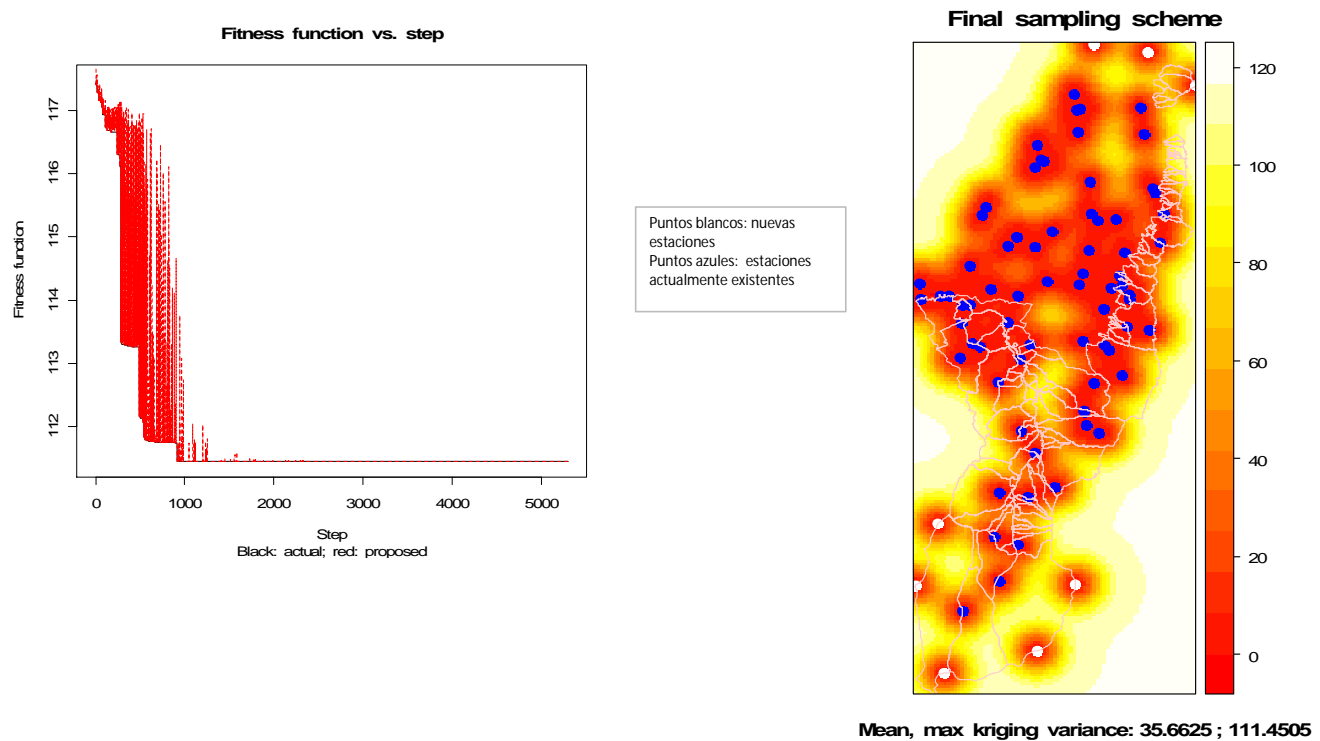


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

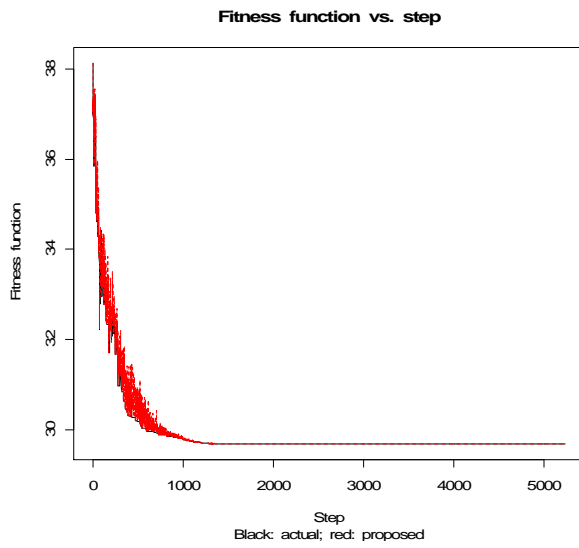


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

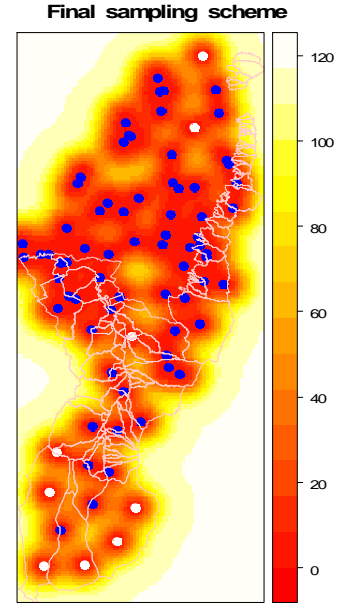
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones

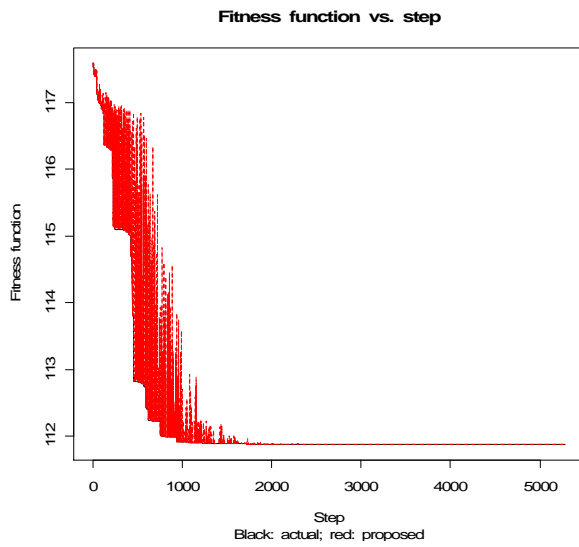
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y



Mean, max kriging variance: 29.6748 ; 116.6026

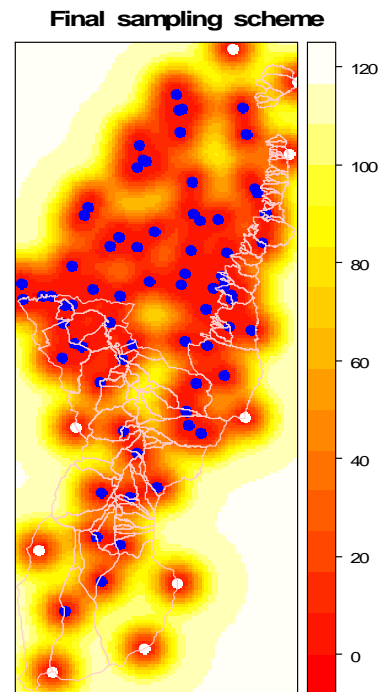
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones

 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

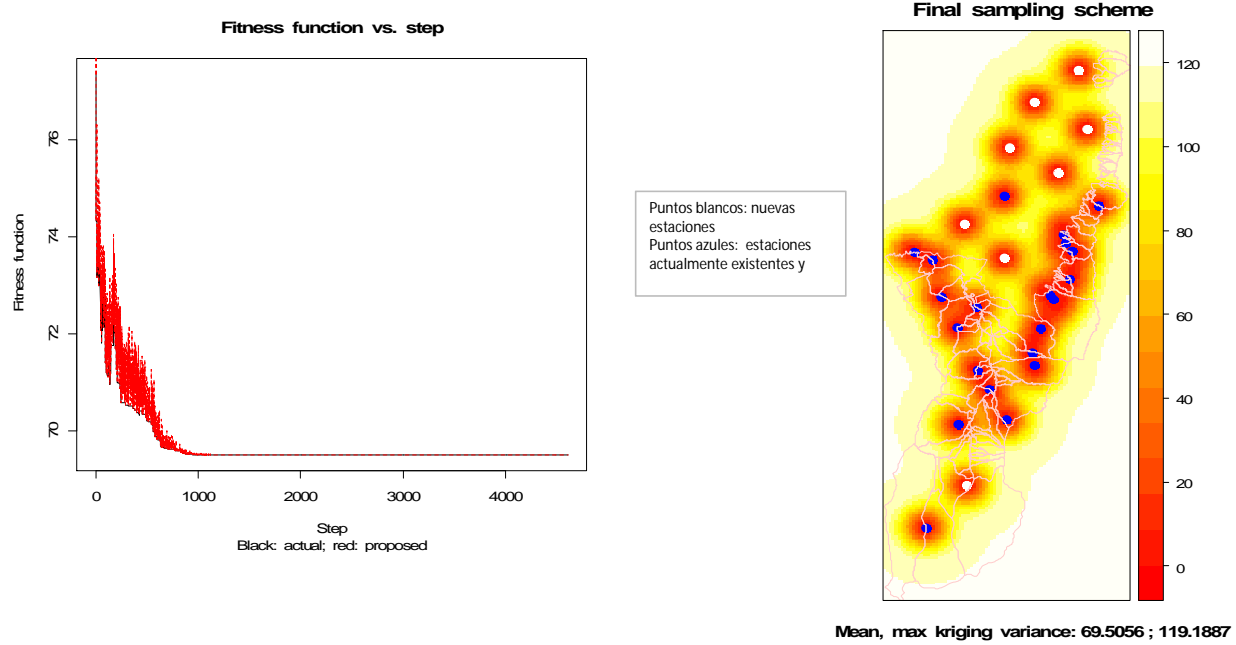


Mean, max kriging variance: 34.8144 ; 111.8789

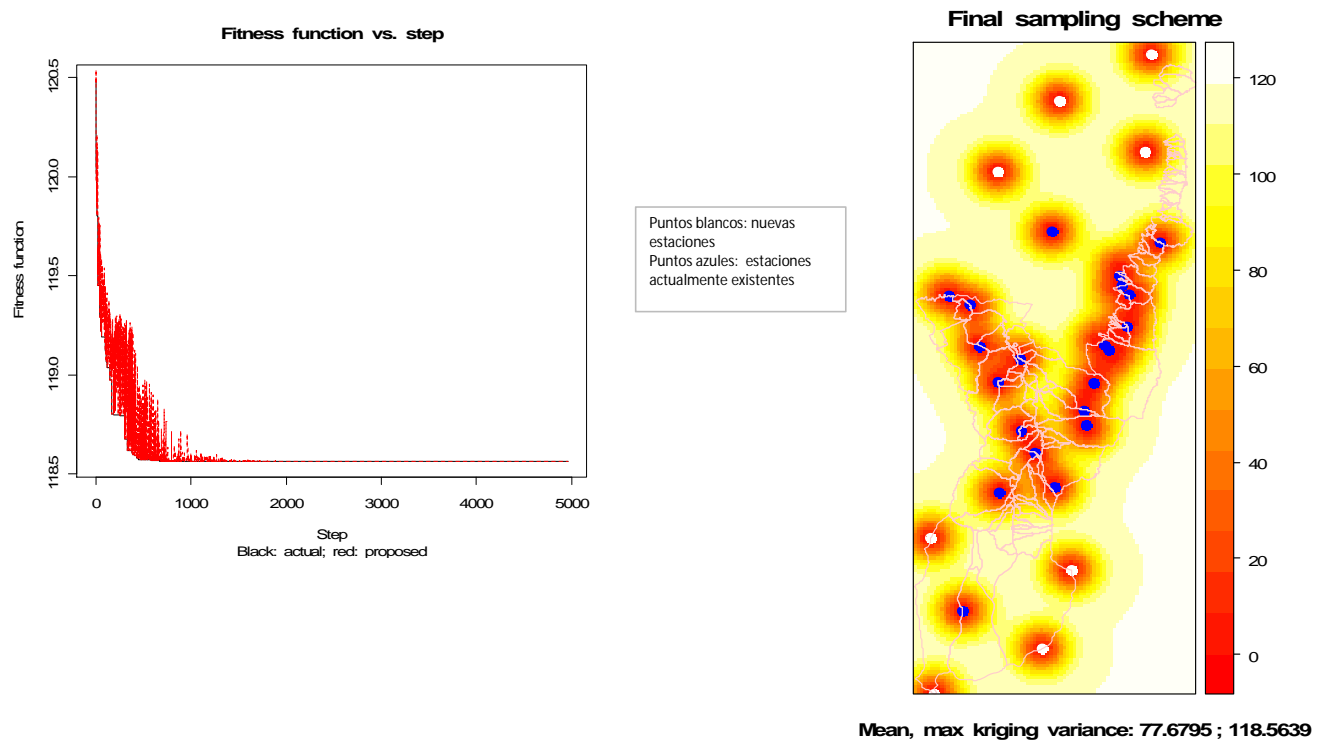
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



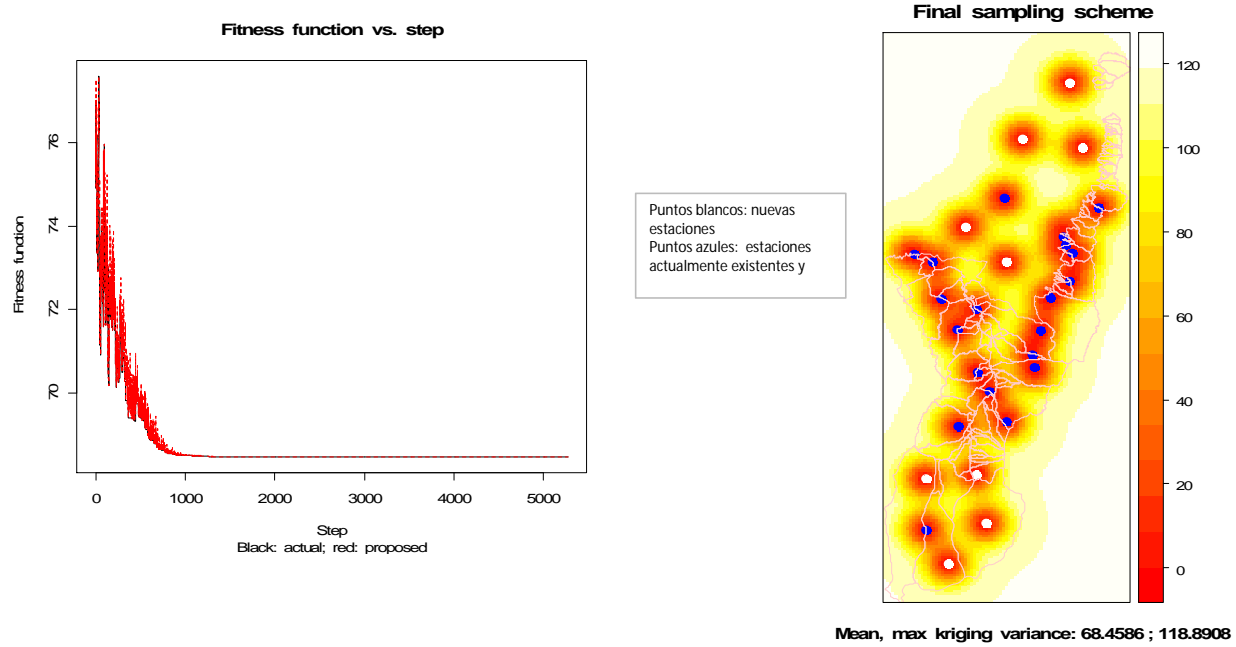
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



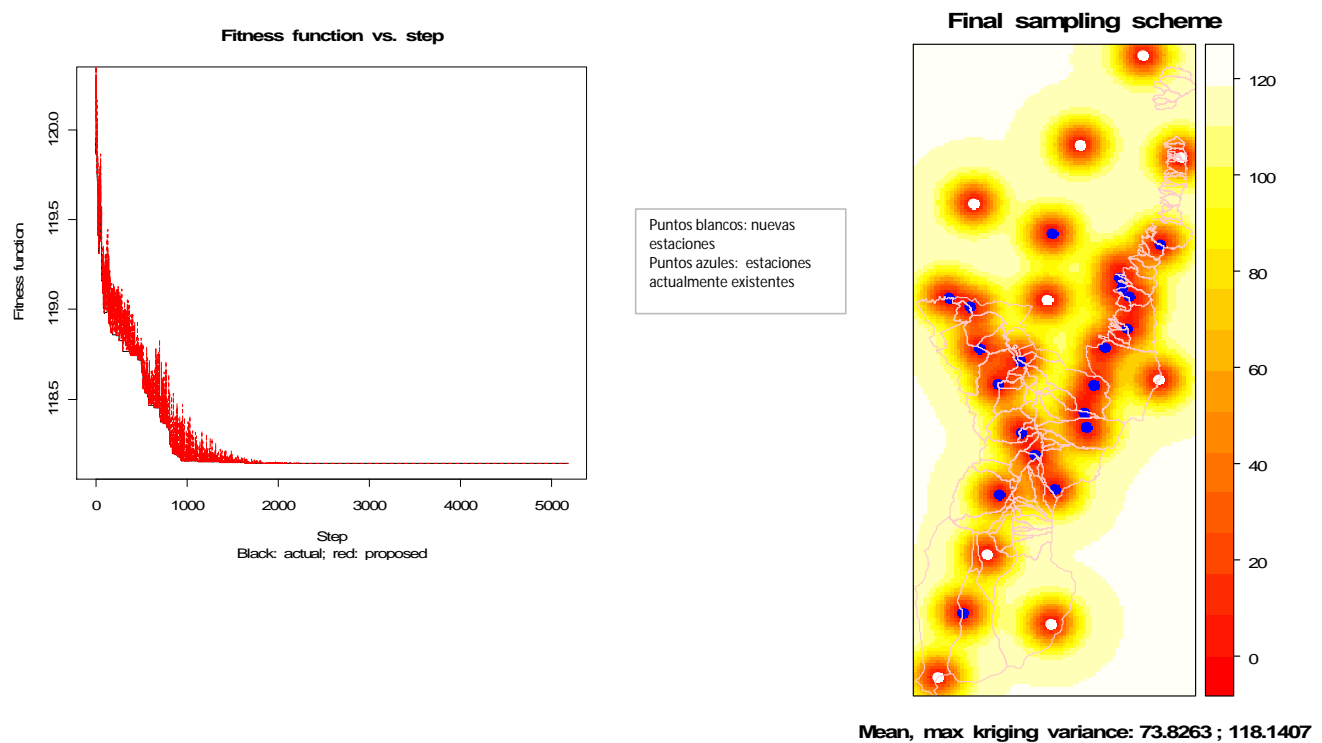
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



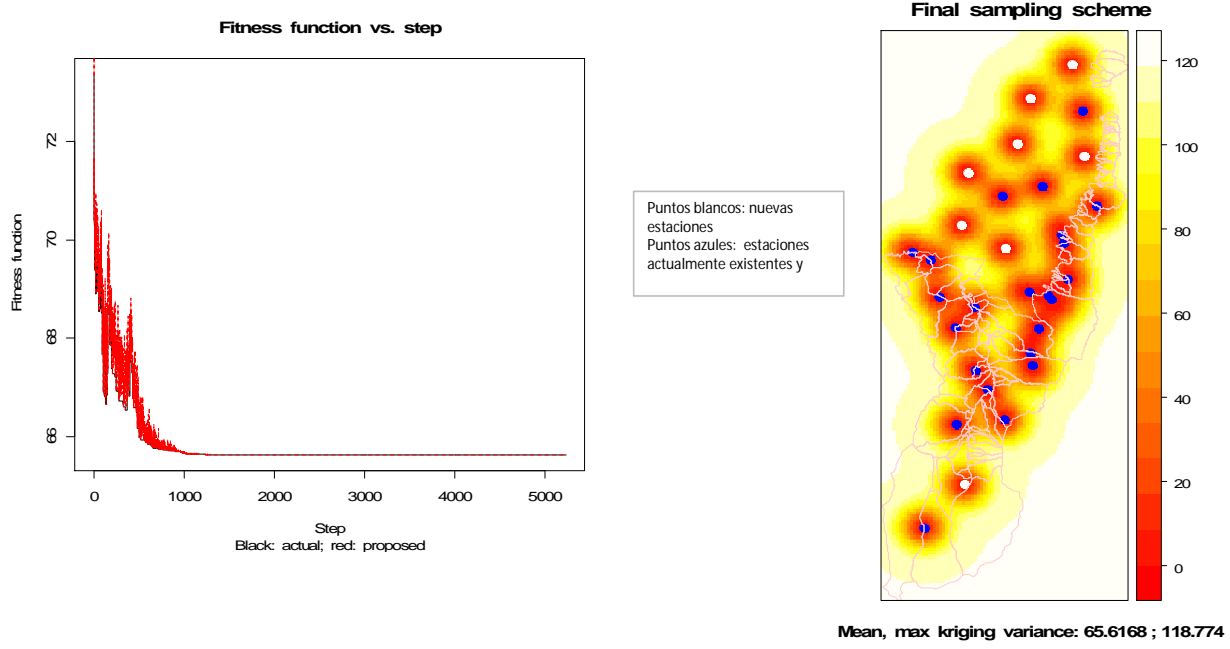
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



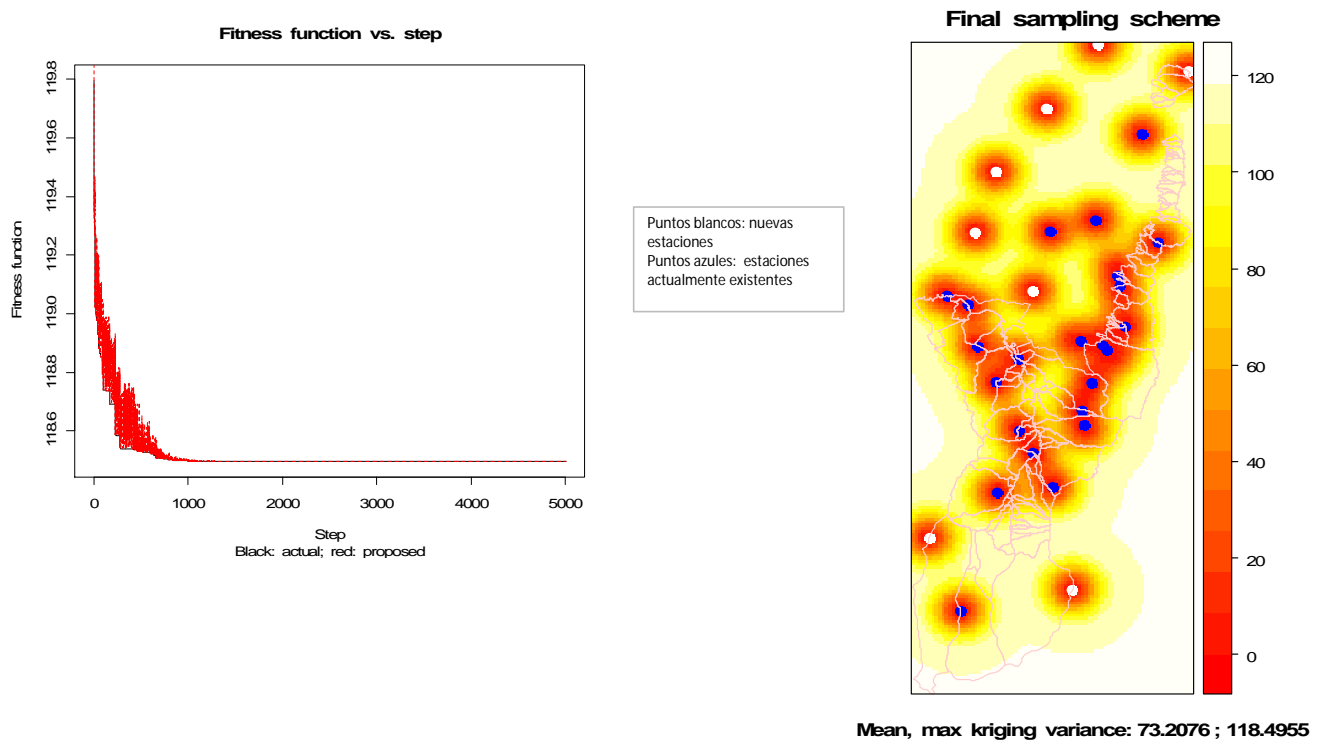
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

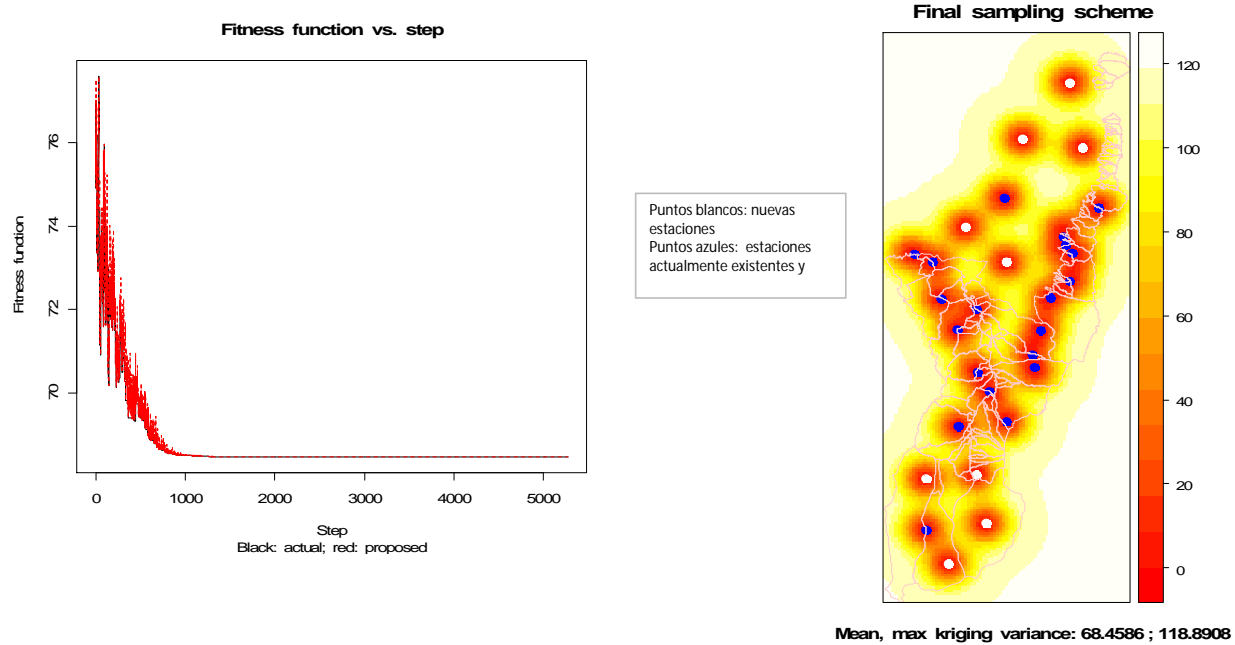


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

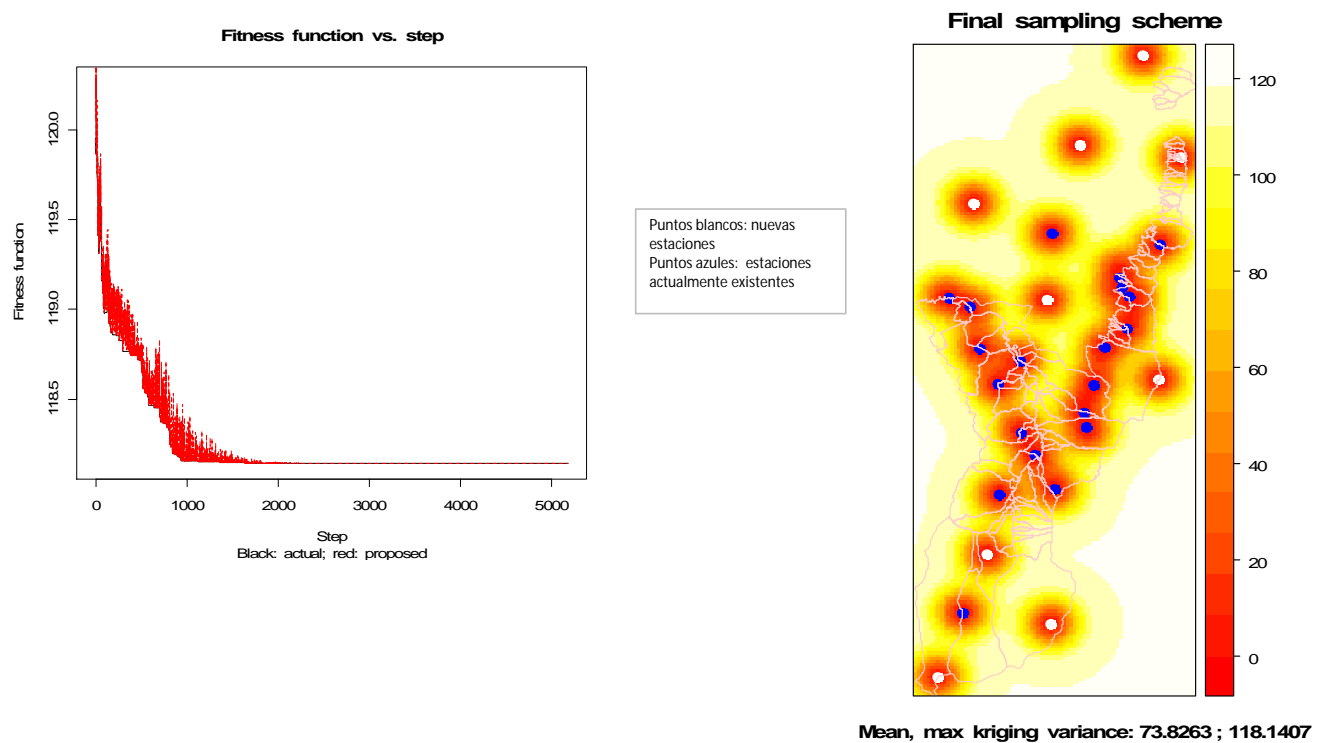


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 06-09-03
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

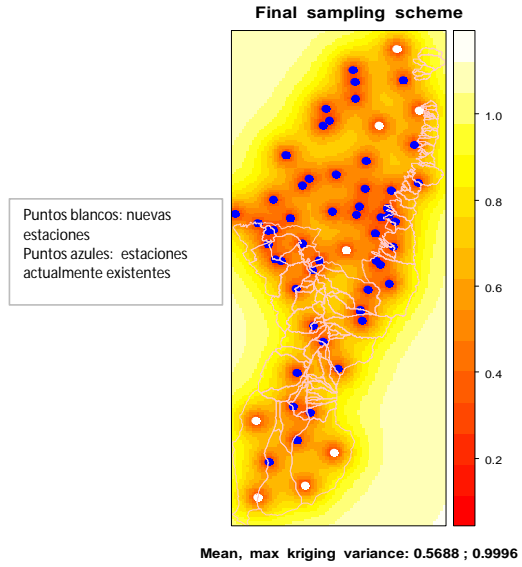
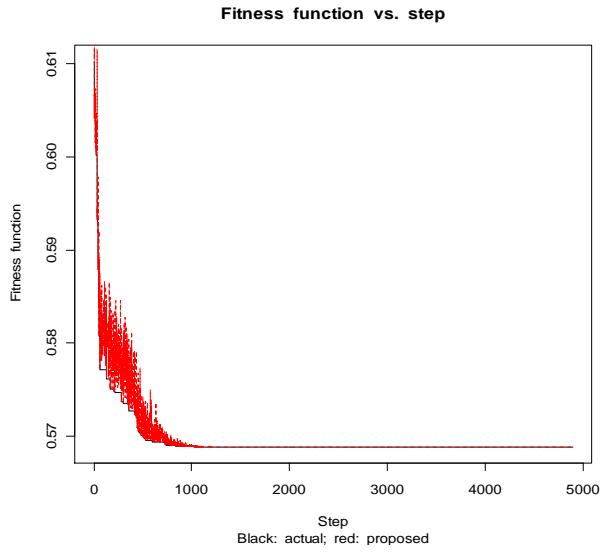


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

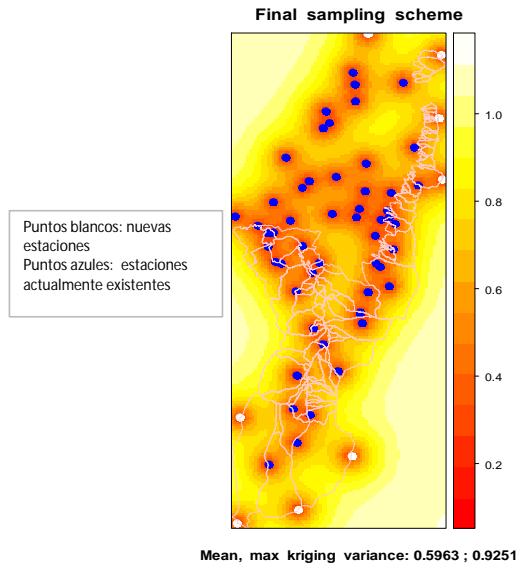
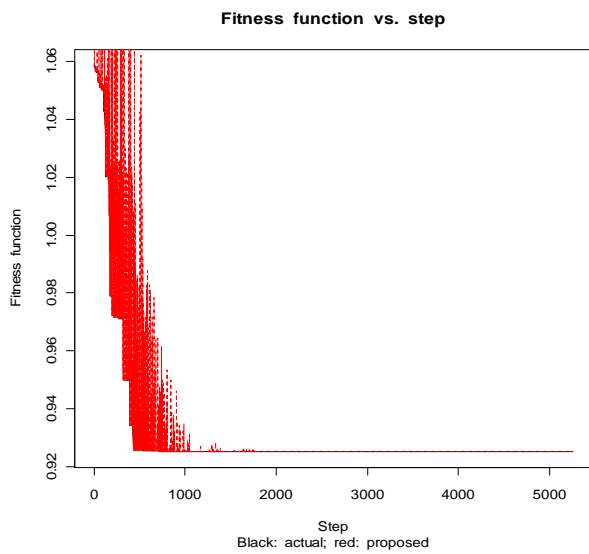


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

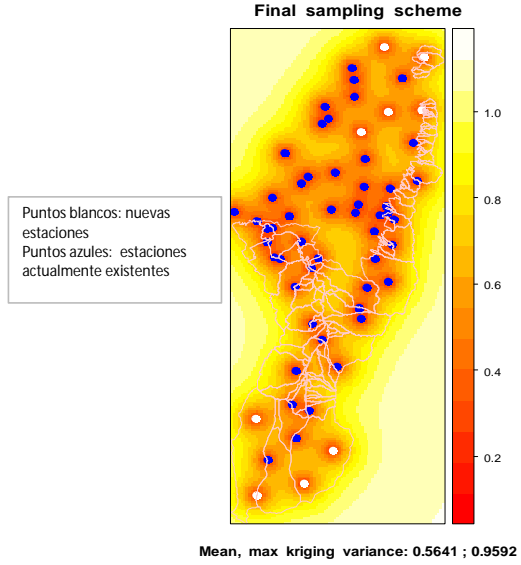
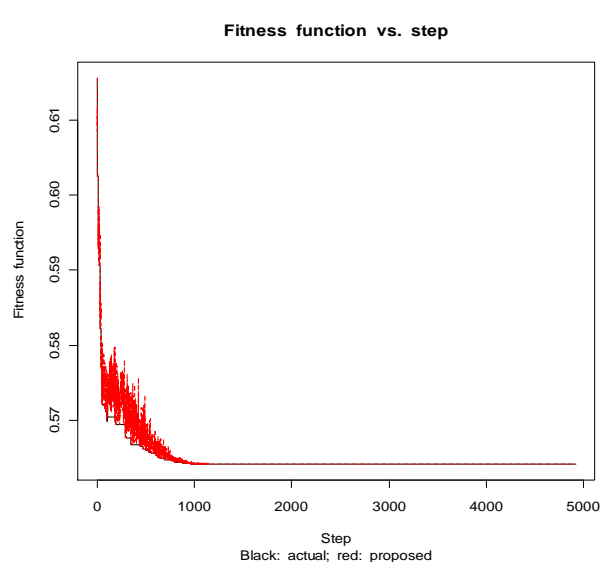


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

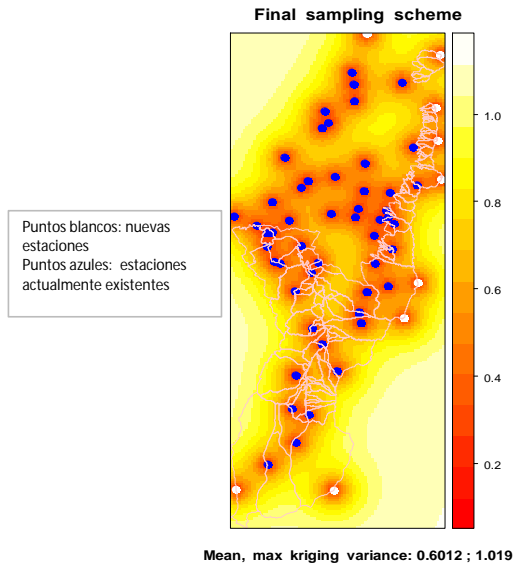
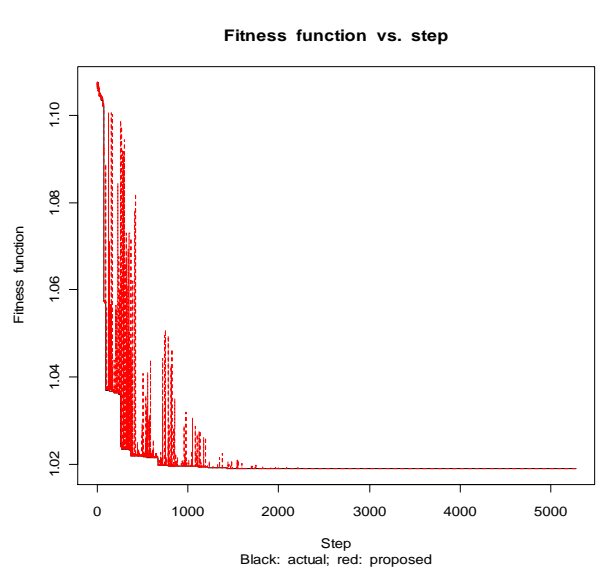
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

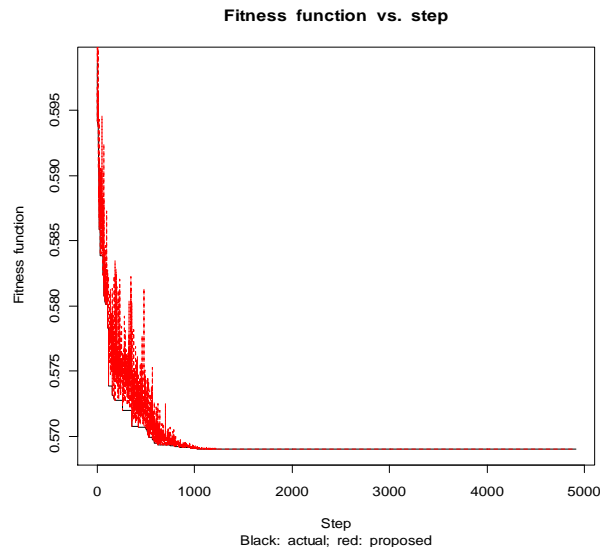
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



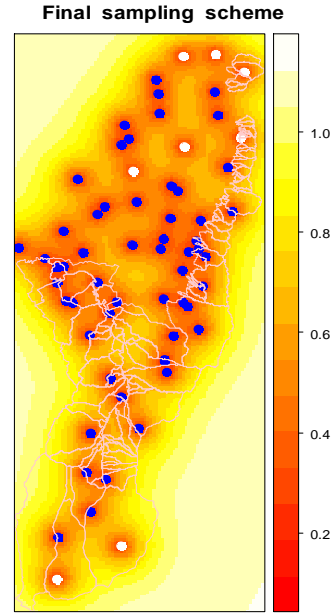
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

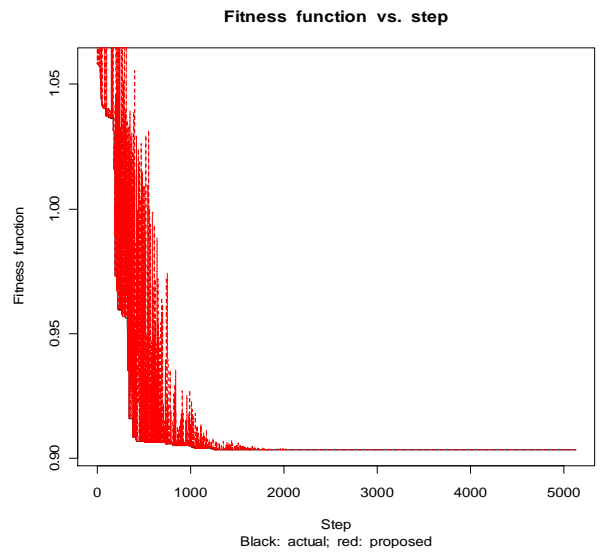


Puntos blancos: nuevas estaciones
Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

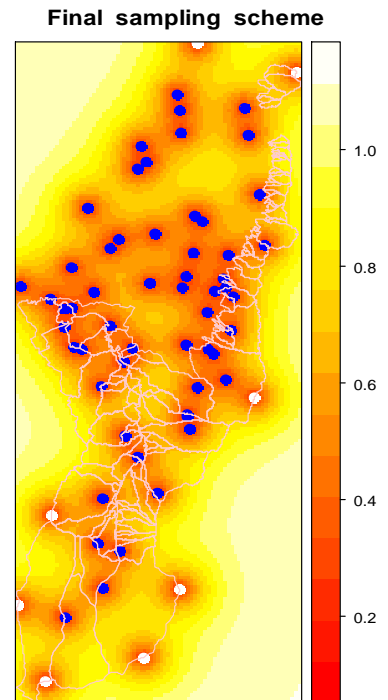


Mean, max kriging variance: 0.569 ; 1.0258

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



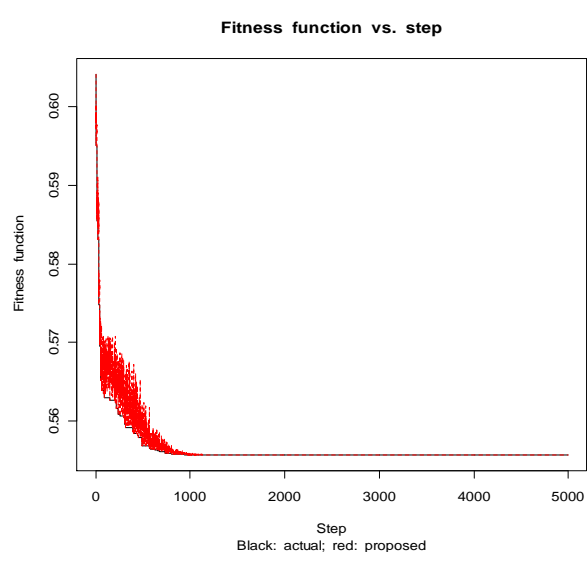
Puntos blancos: nuevas estaciones
Puntos azules: estaciones actualmente existentes



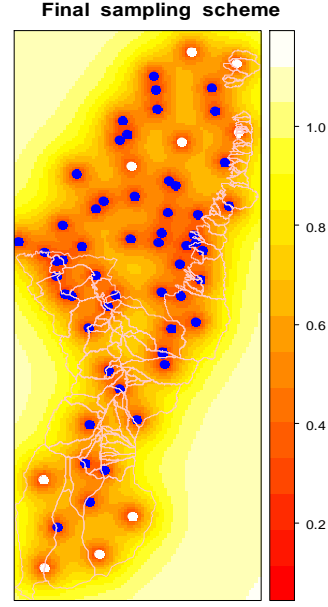
Mean, max kriging variance: 0.5804 ; 0.9034

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

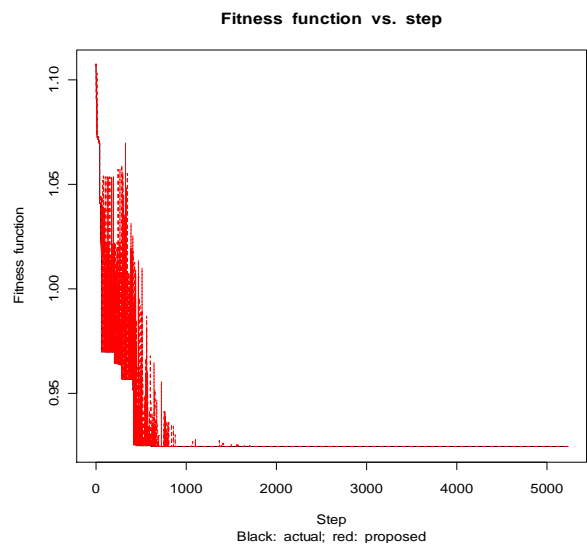


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

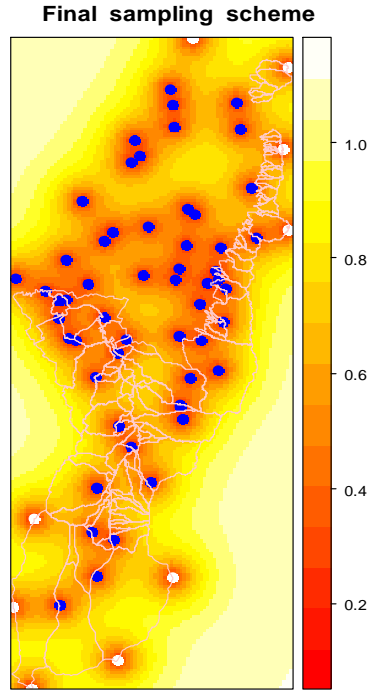


Mean, max kriging variance: 0.5557 ; 0.9592

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



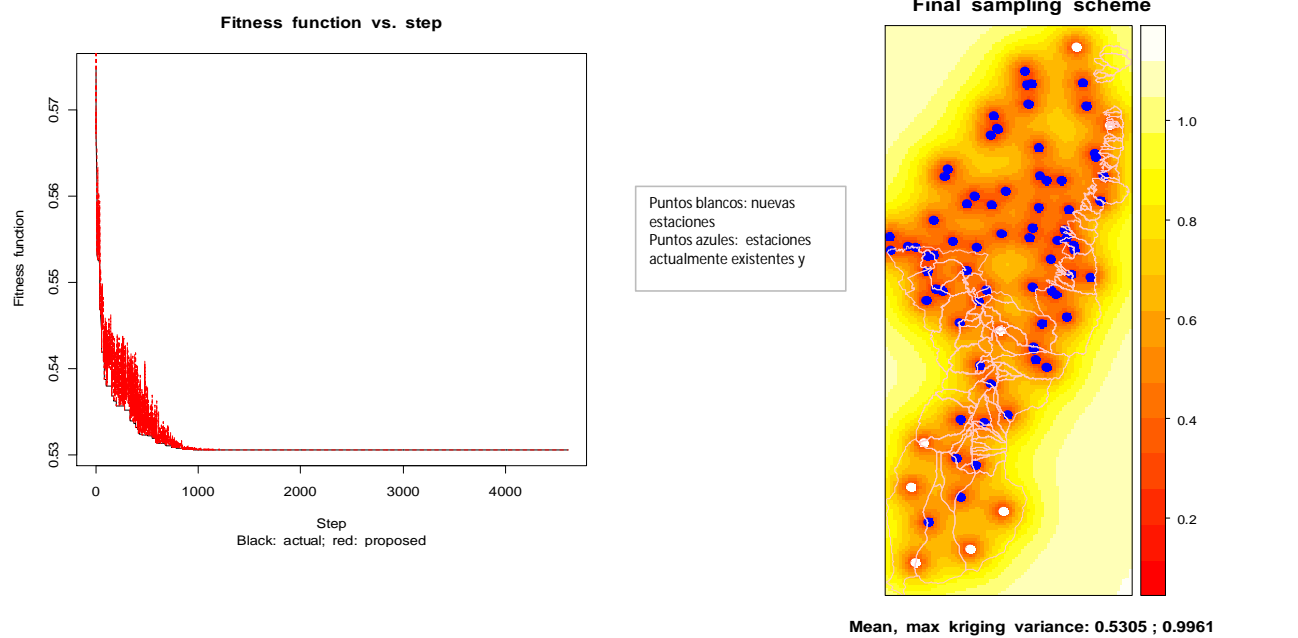
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



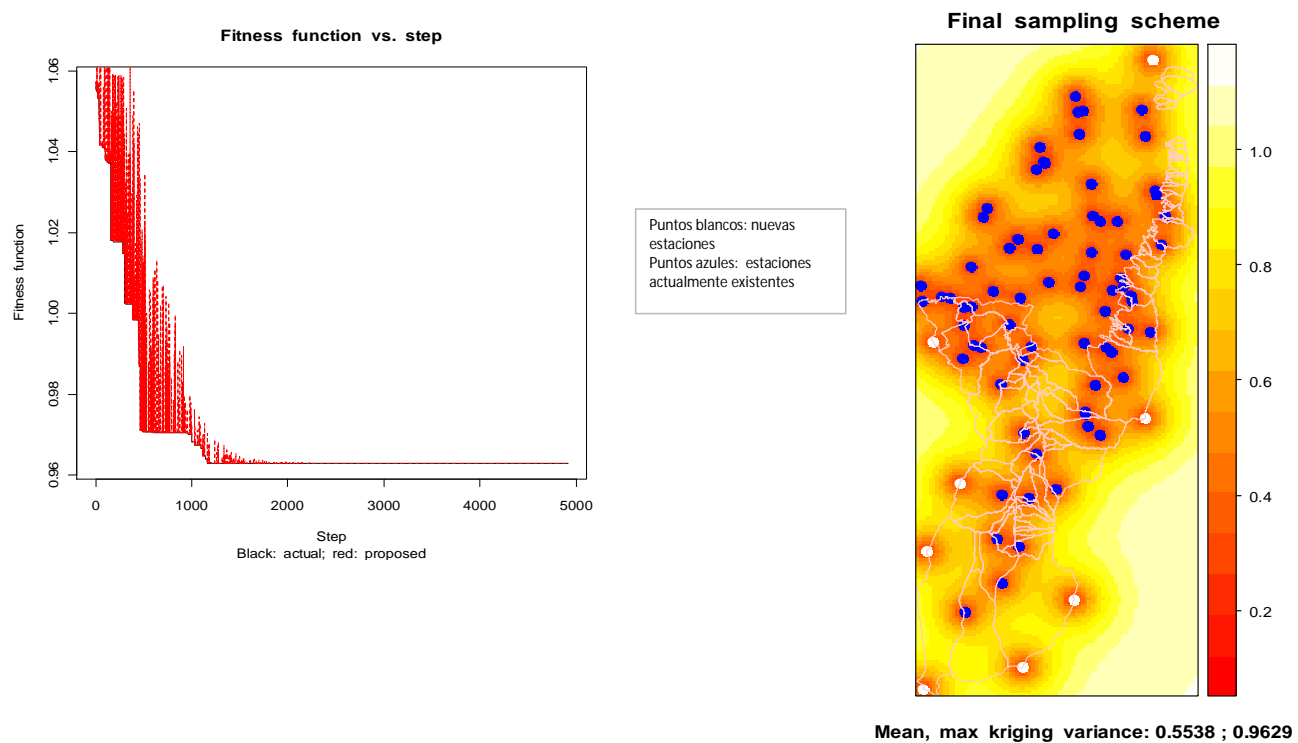
Mean, max kriging variance: 0.5837 ; 0.9247

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

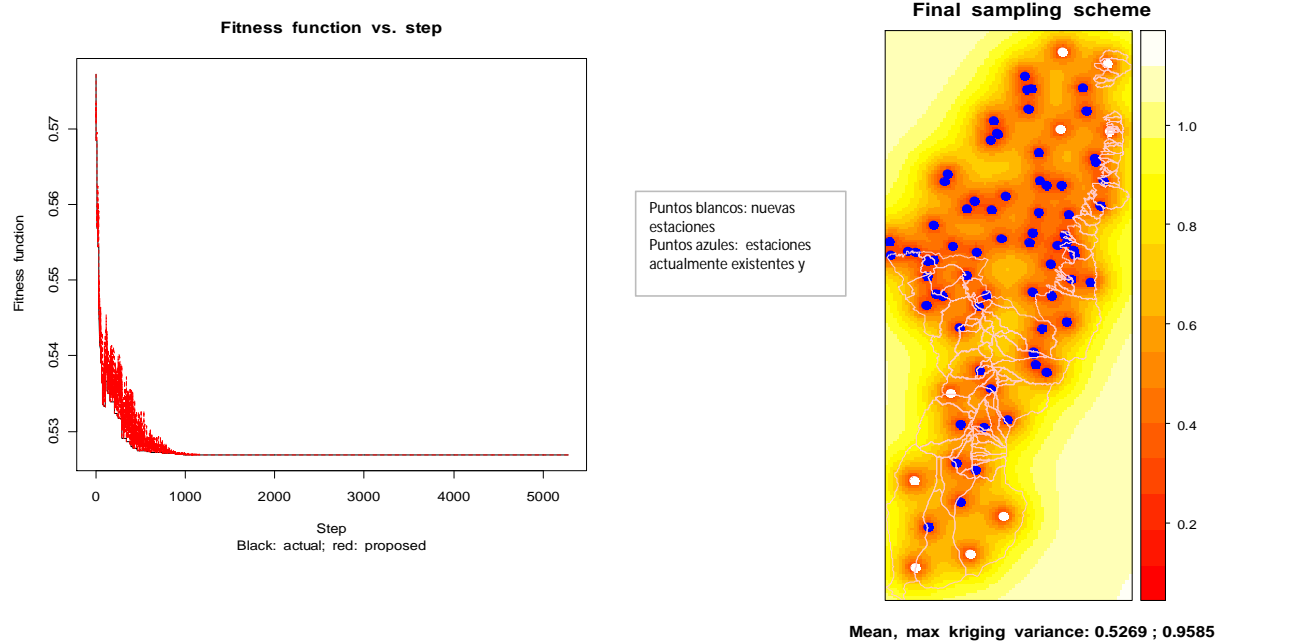


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

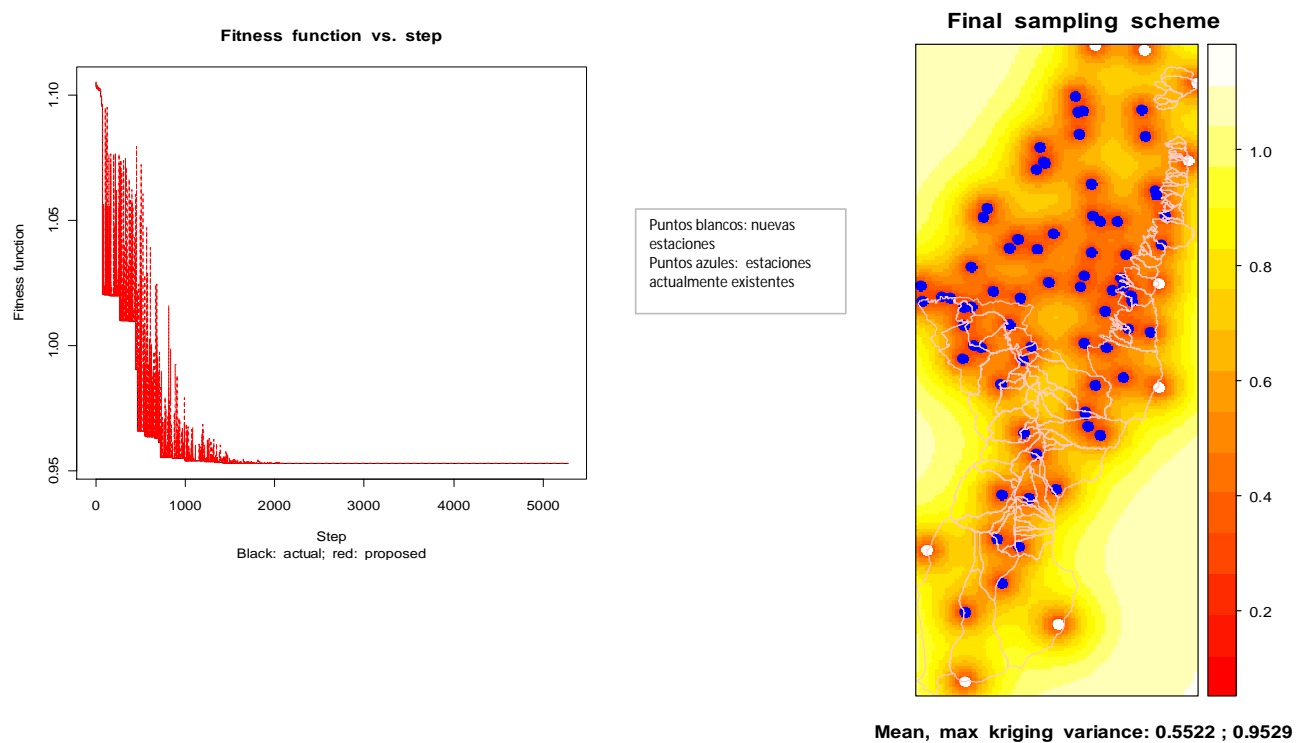


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL

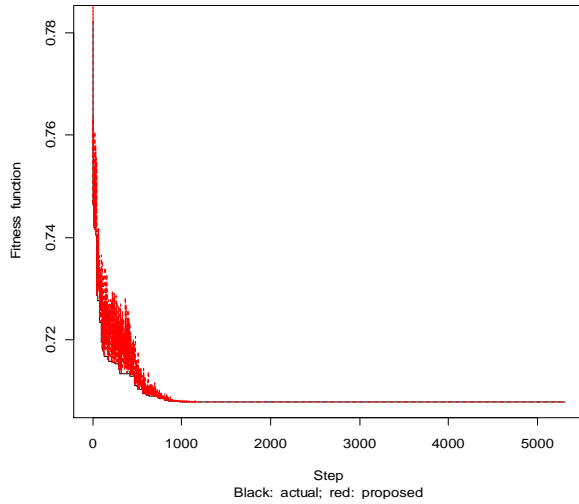
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

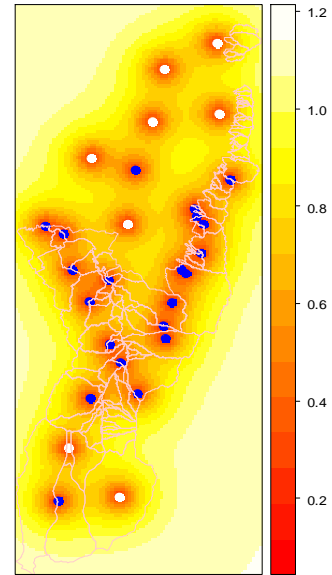
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme

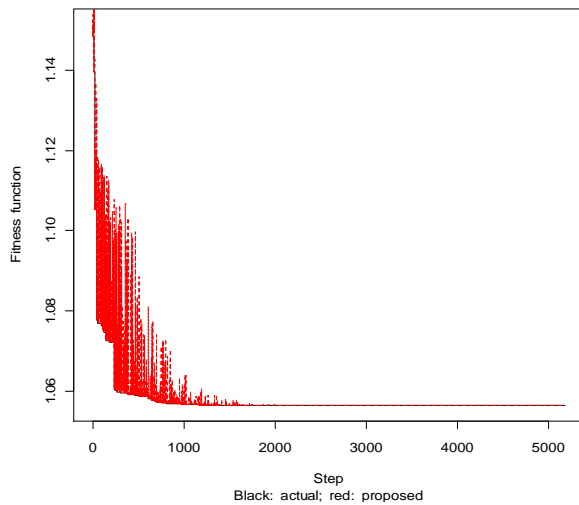


Mean, max kriging variance: 0.7078 ; 1.1132

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

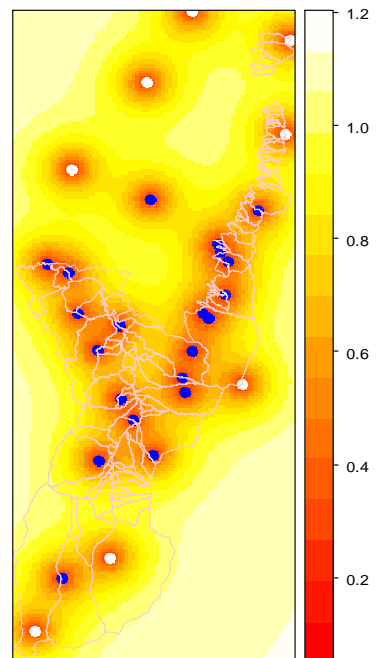
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 0.7582 ; 1.0564

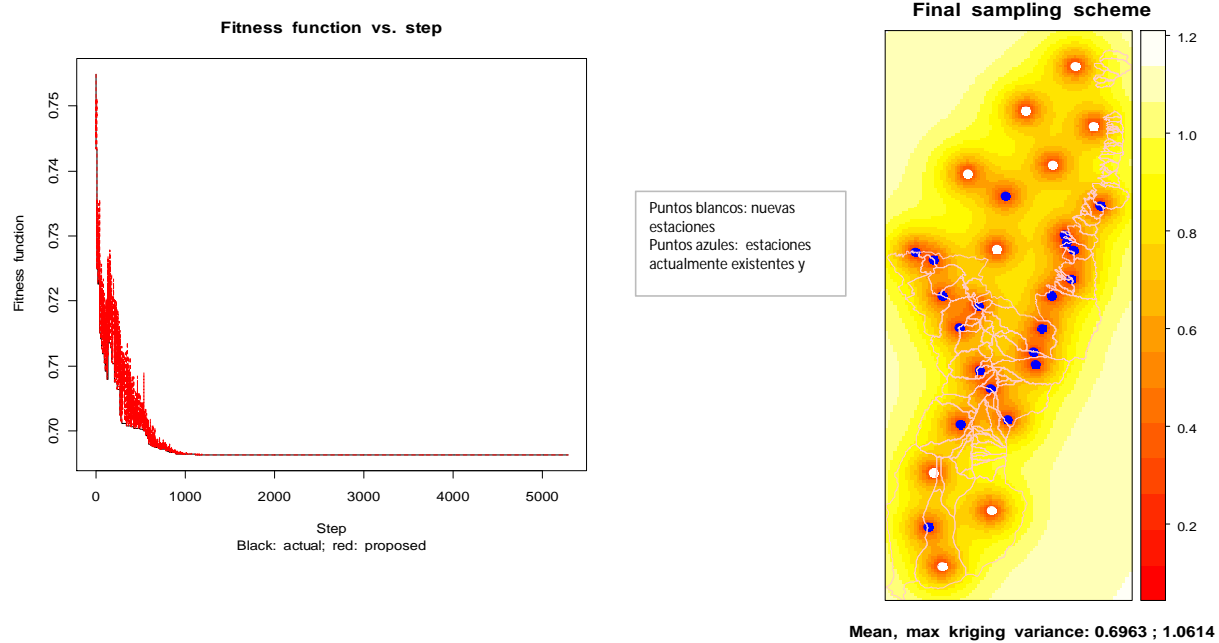
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL

ESCENARIO:

 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

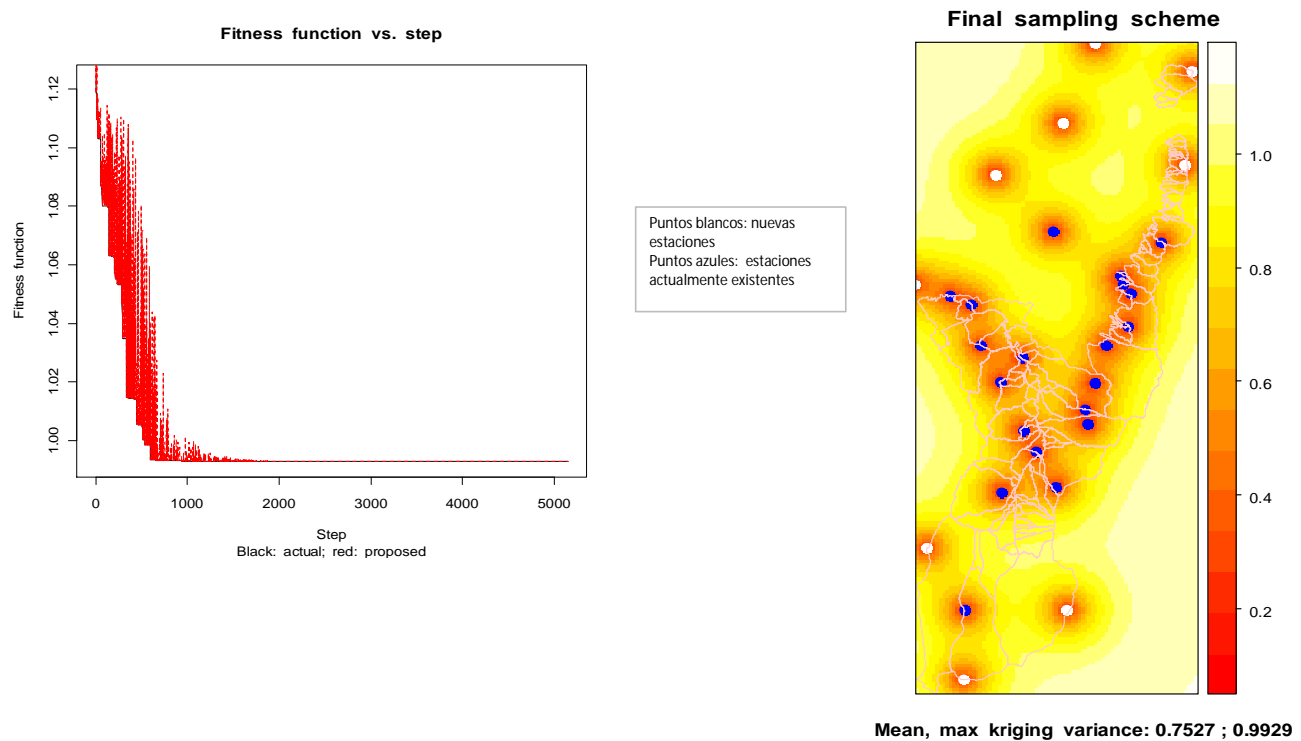
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

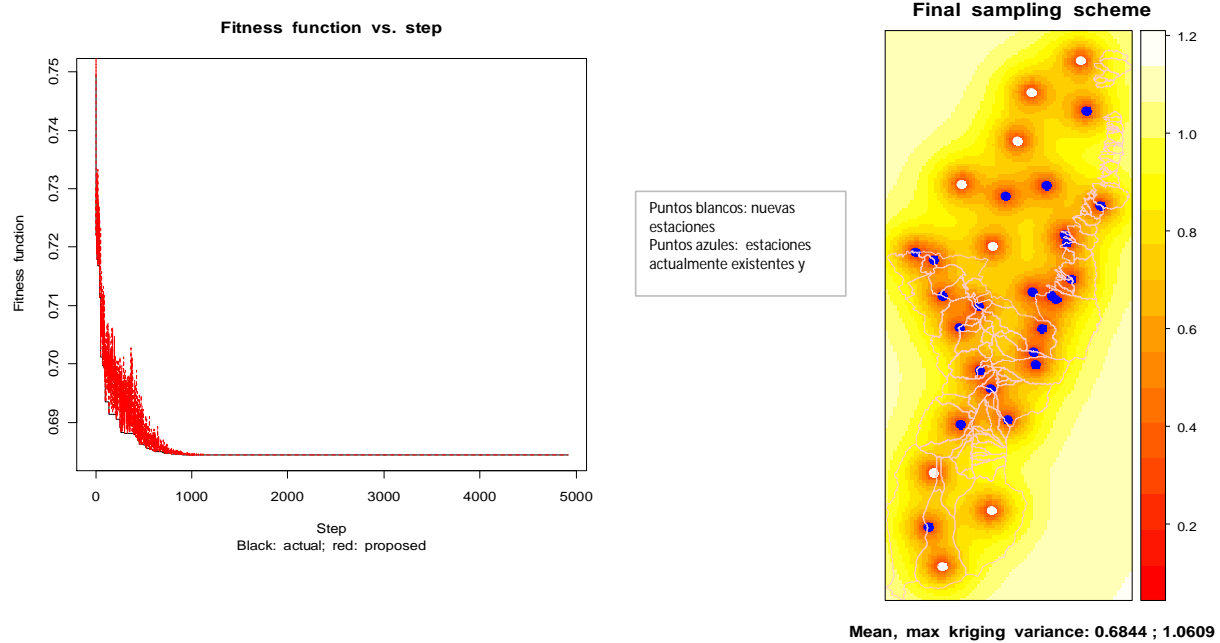
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



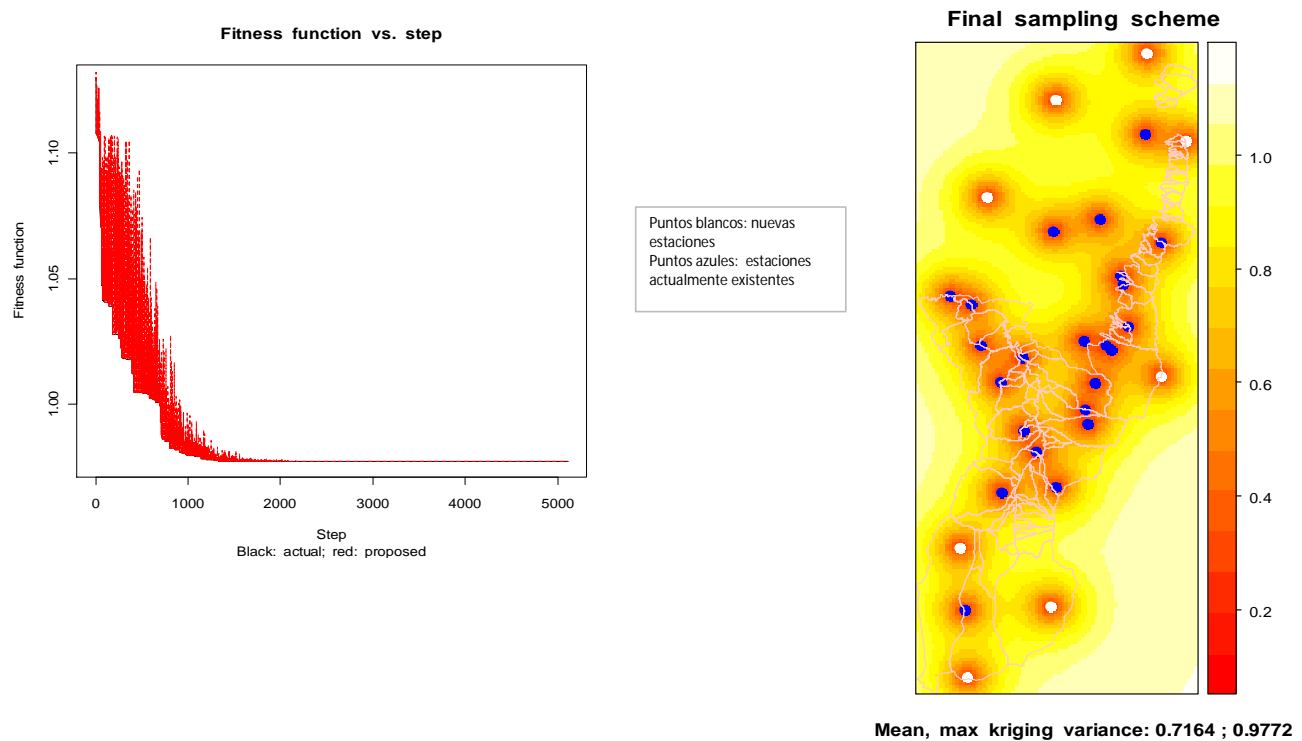
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

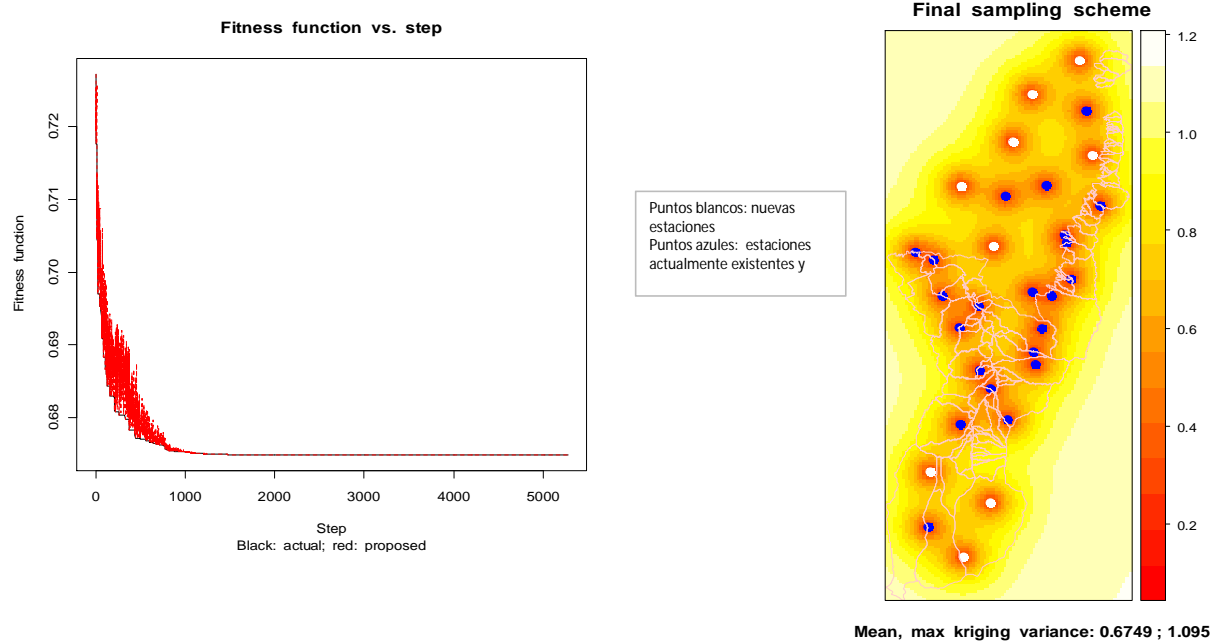


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

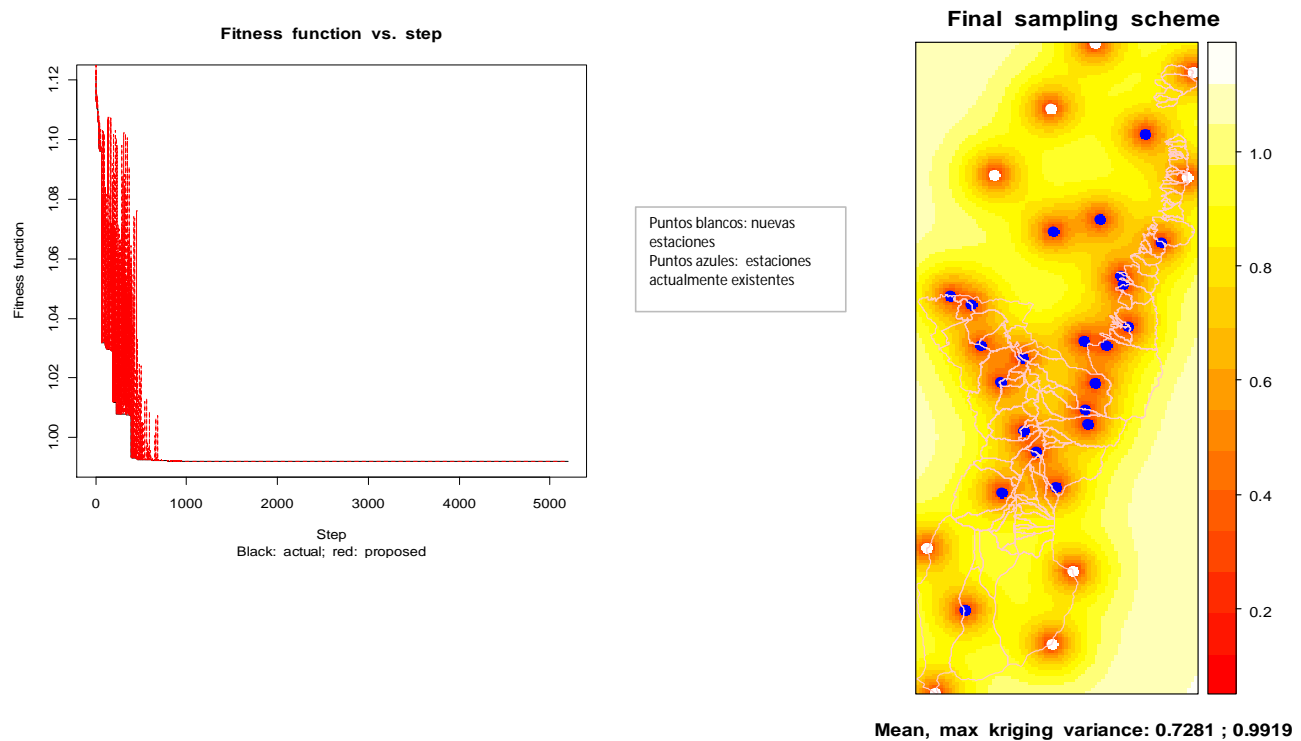


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO EXPONENCIAL
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

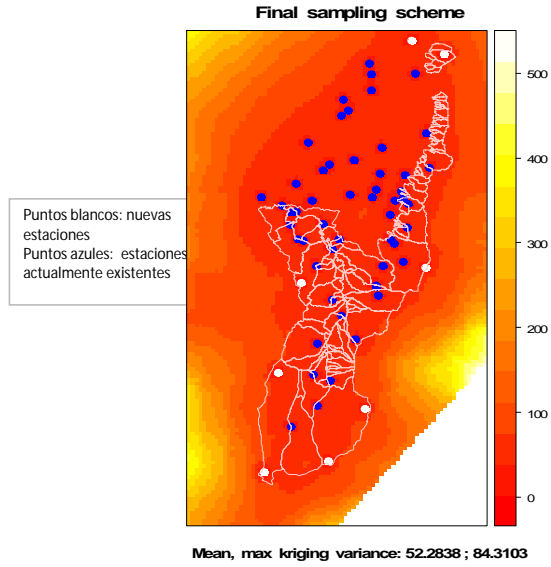
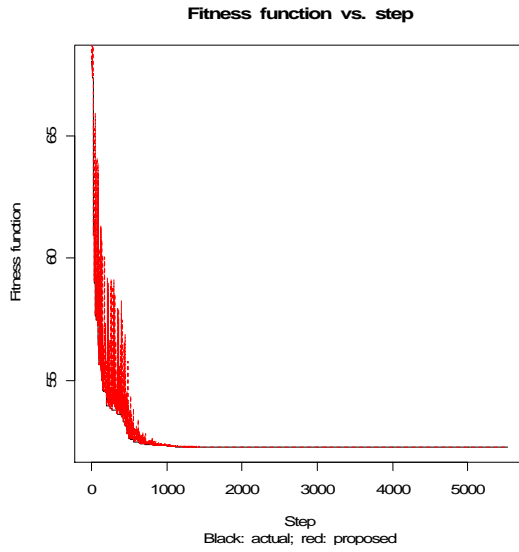


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

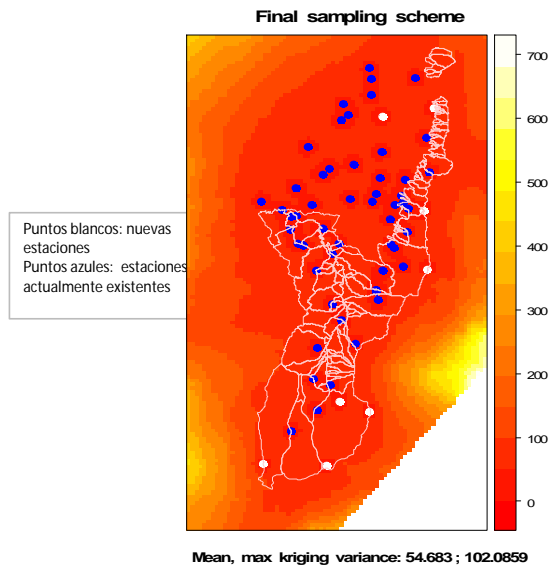
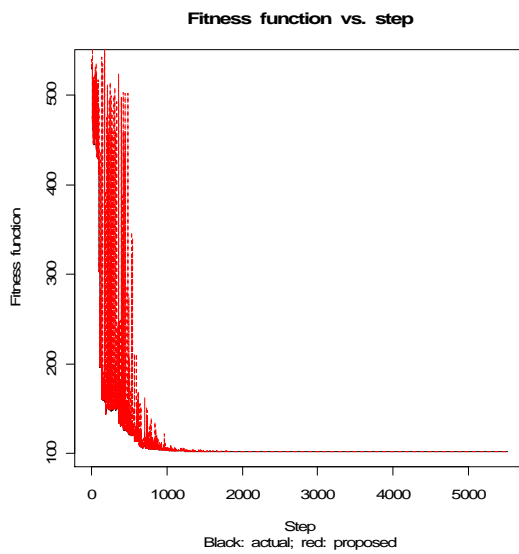
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

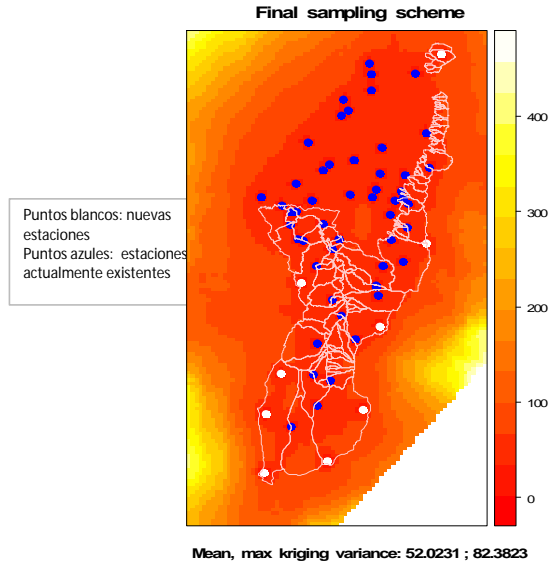
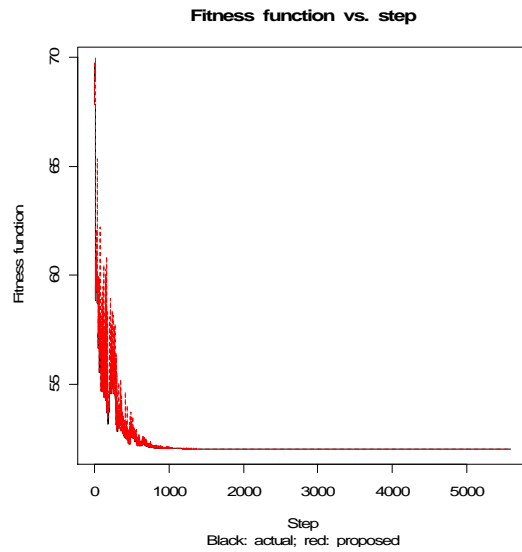


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

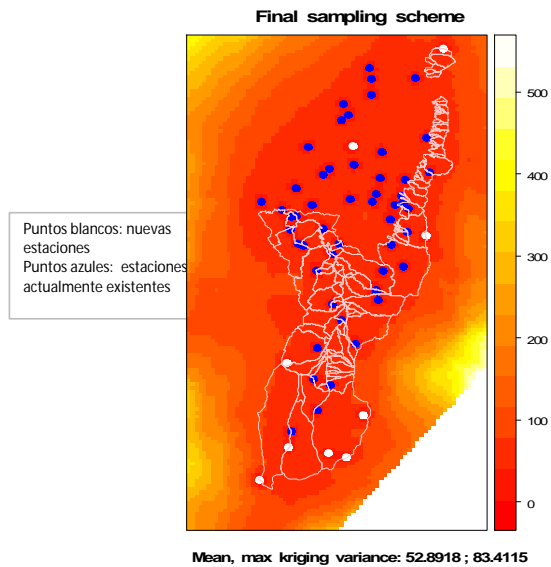
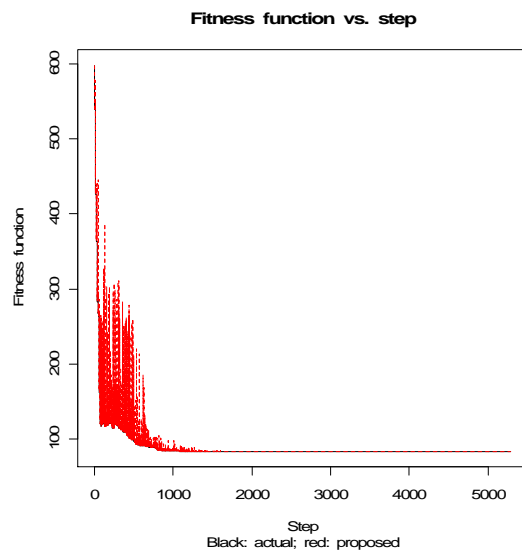
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

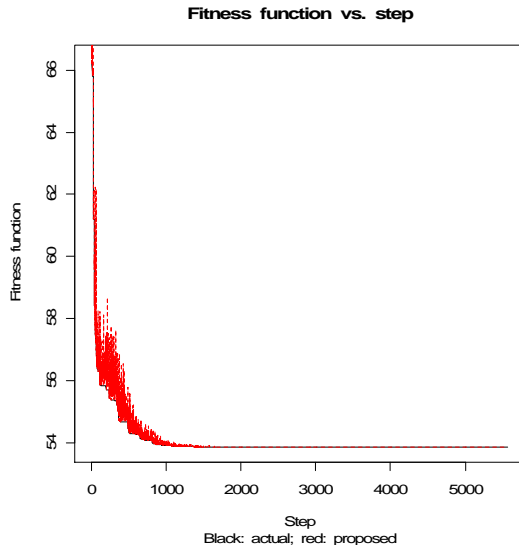


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

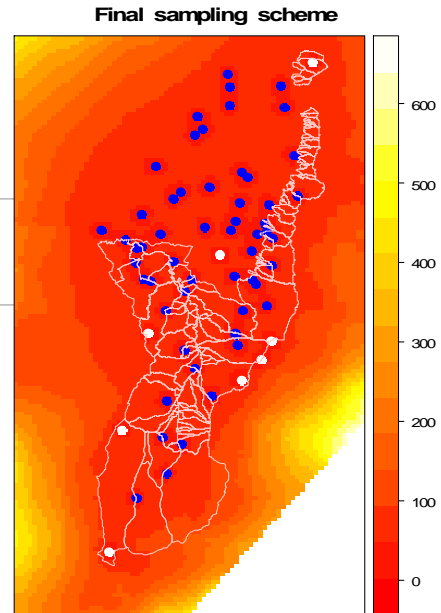
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio



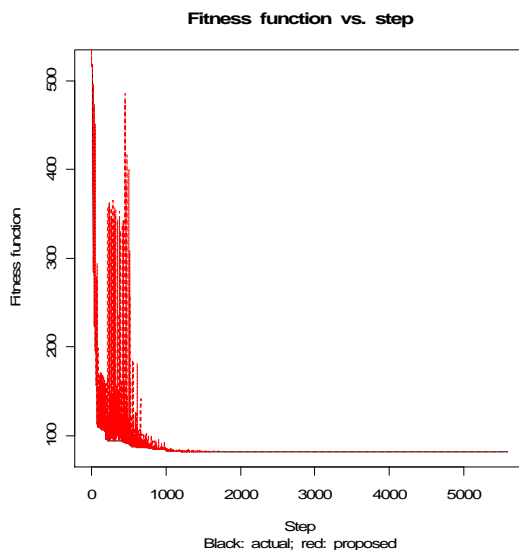
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y



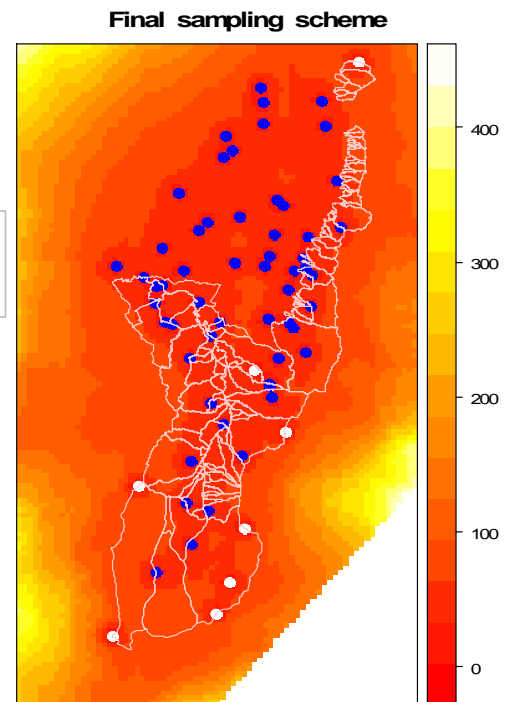
Mean, max kriging variance: 53.8609 ; 142.066

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



Mean, max kriging variance: 52.35 ; 81.7904

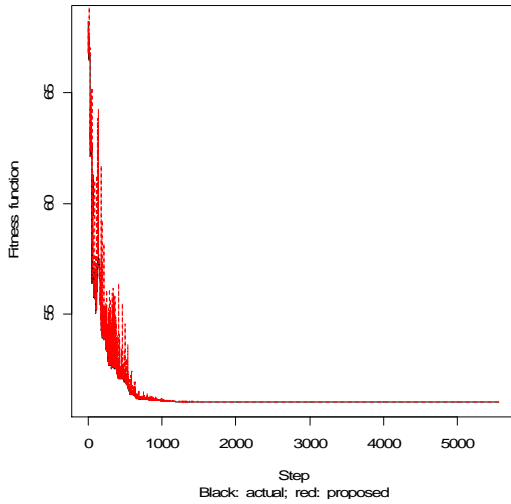
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

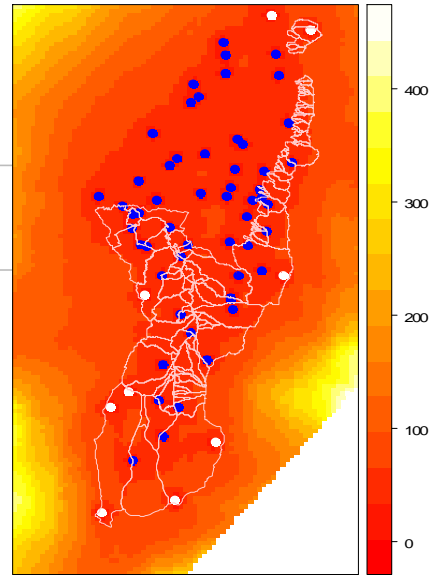
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme

Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

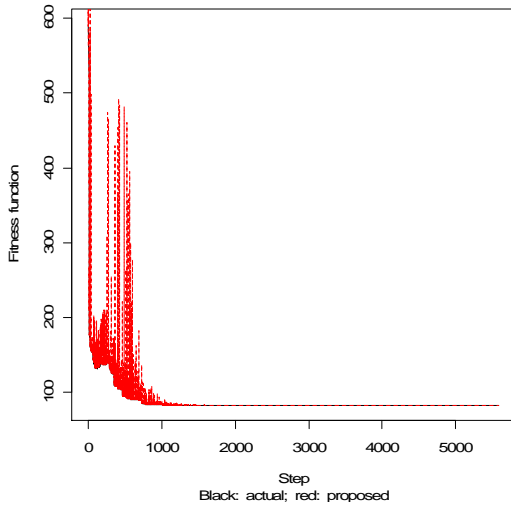


Mean, max kriging variance: 51.038 ; 83.4827

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

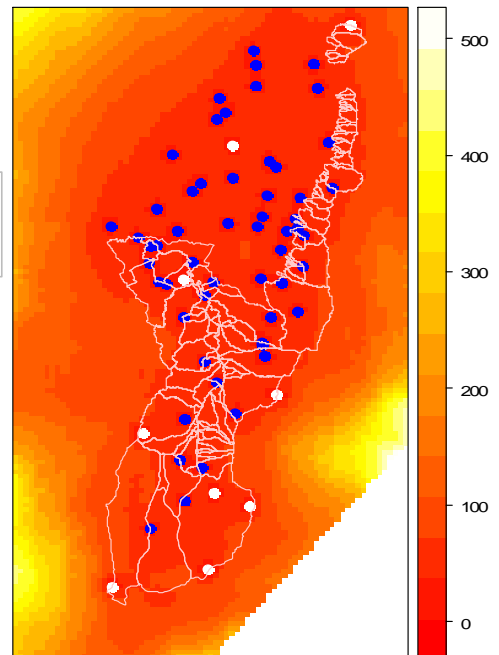
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 52.398 ; 82.746

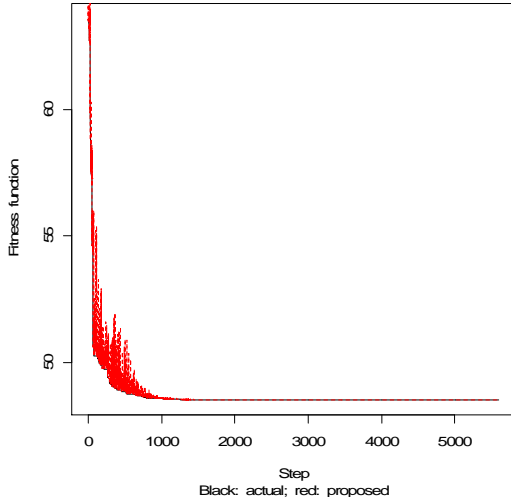
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

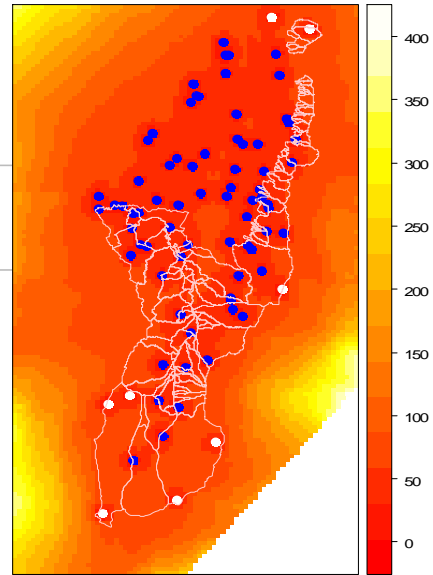
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme



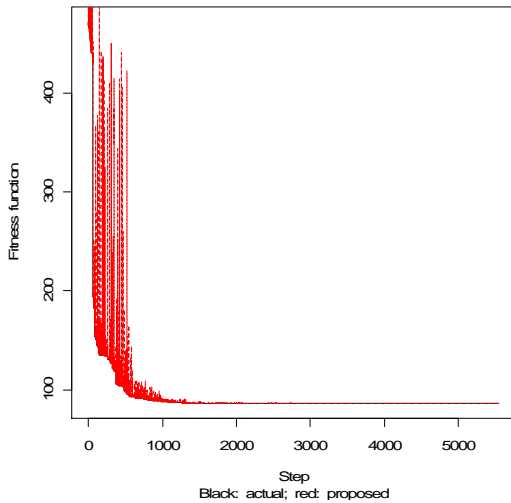
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

Mean, max kriging variance: 48.5101 ; 81.9241

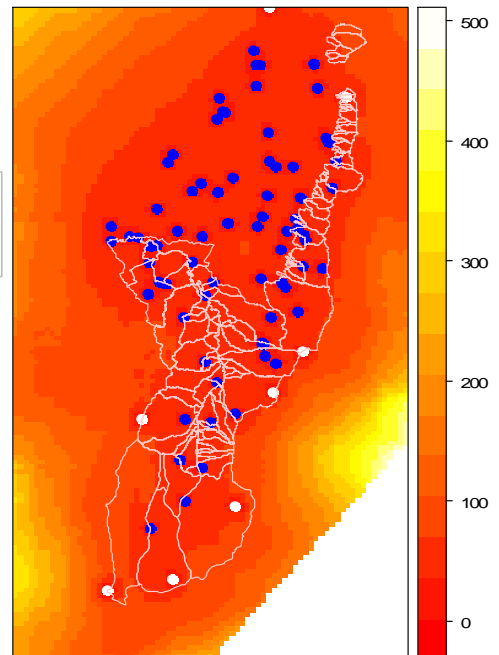
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme

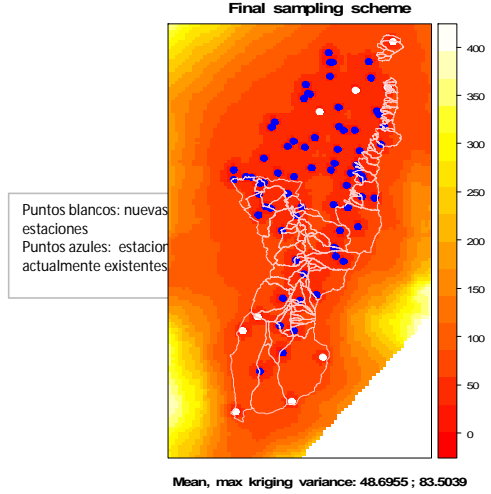
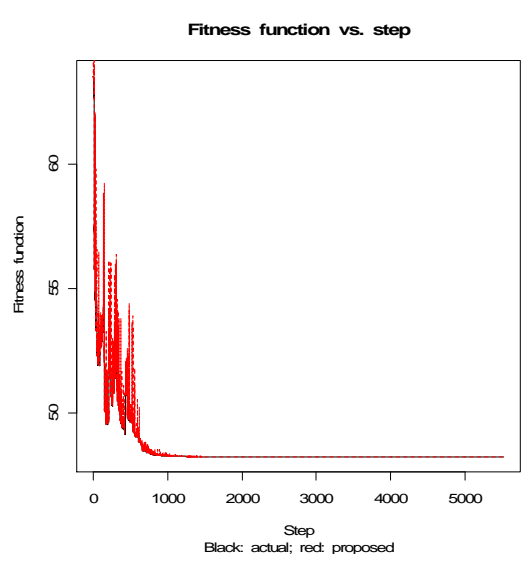


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

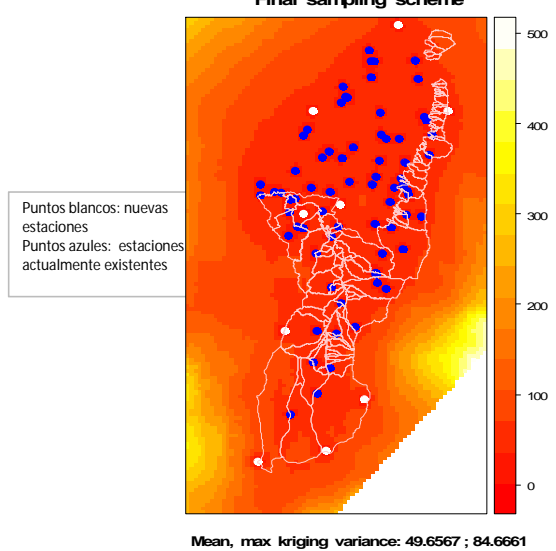
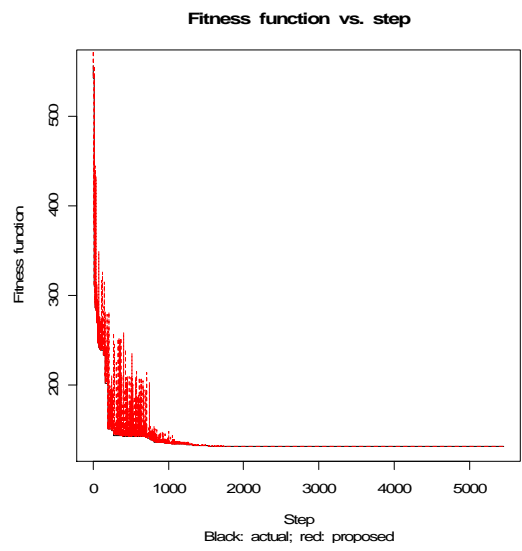
Mean, max kriging variance: 49.4957 ; 86.2902

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

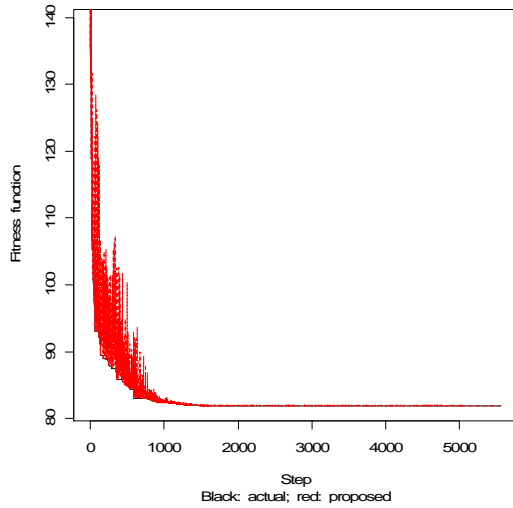
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

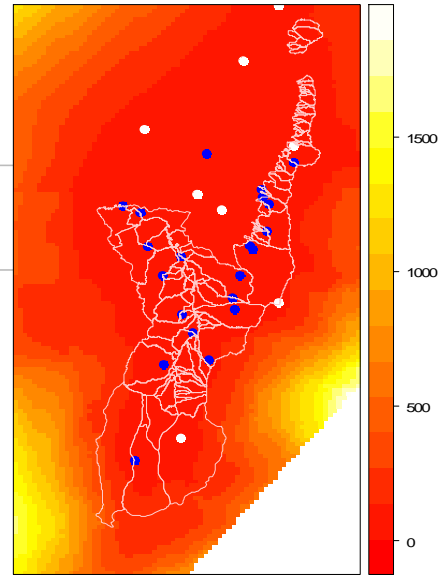
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme

Puntos blancos: nuevas estaciones
Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

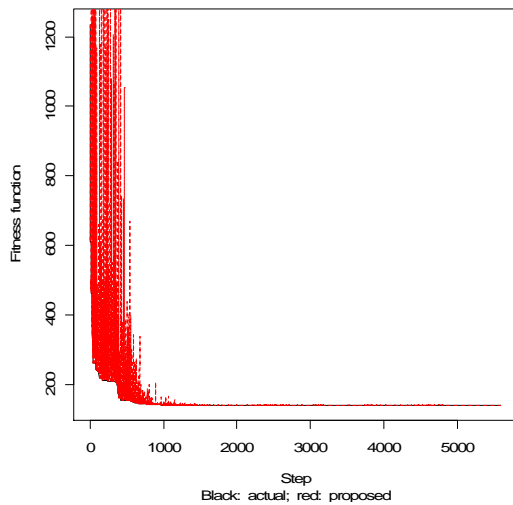


Mean, max kriging variance: 81.8733 ; 499.5579

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

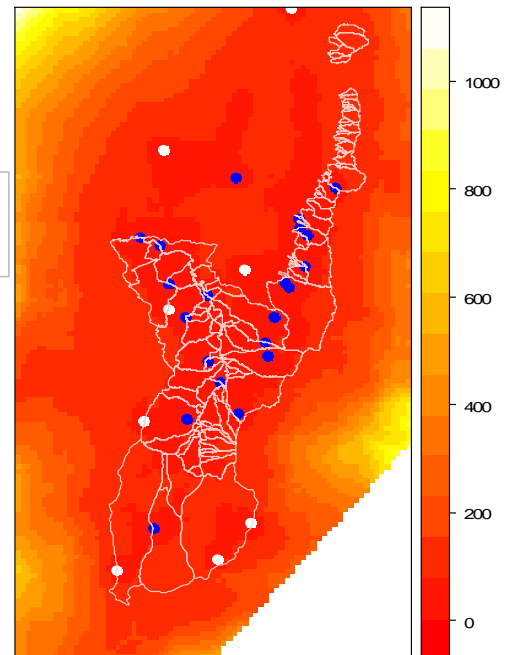
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 75.0577 ; 139.3778

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

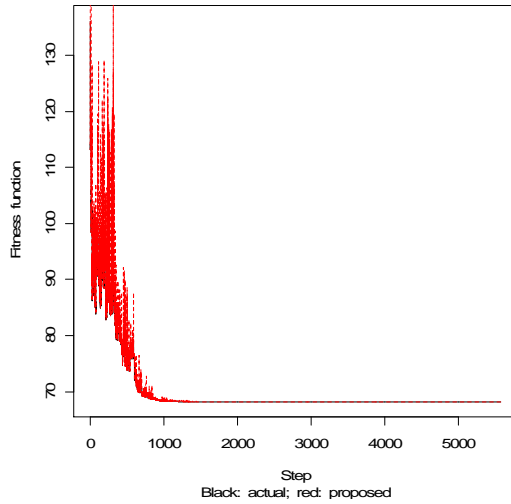
ESCENARIO:

9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

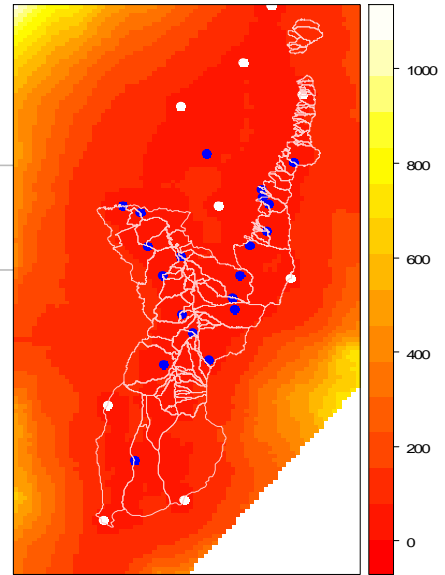
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme

Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

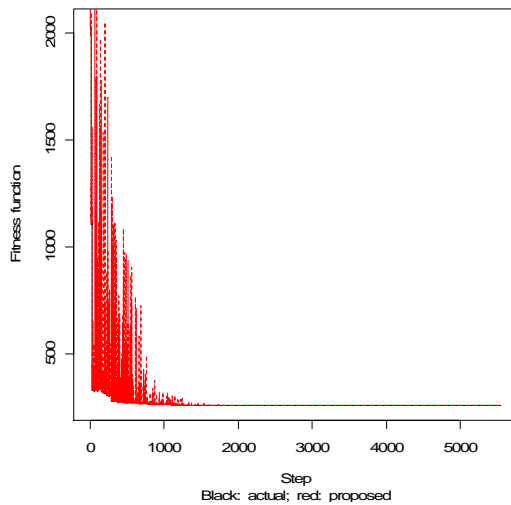


Mean, max kriging variance: 68.1768 ; 161.0391

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

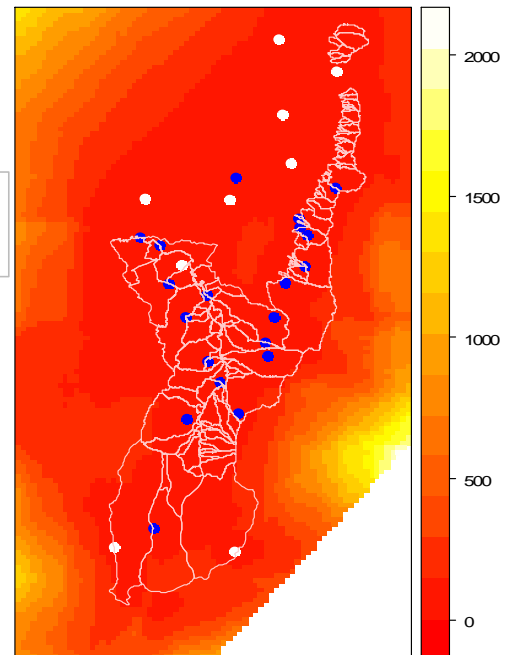
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 86.4135 ; 259.7478

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

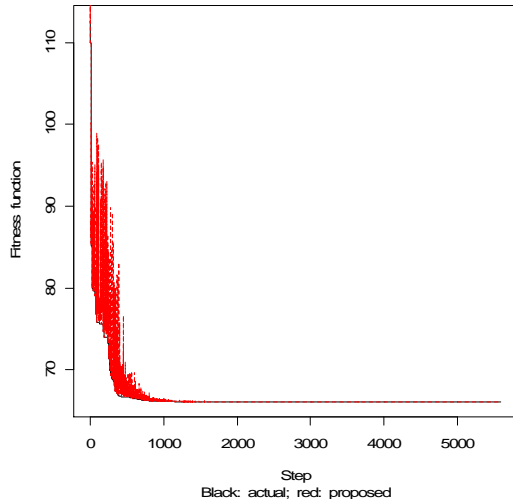
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

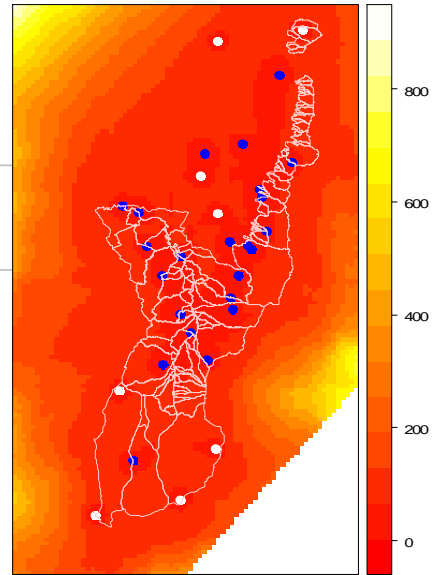
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme



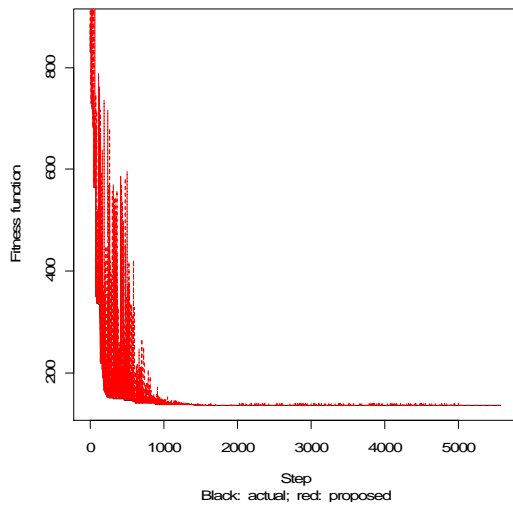
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

Mean, max kriging variance: 66.0894 ; 118.4169

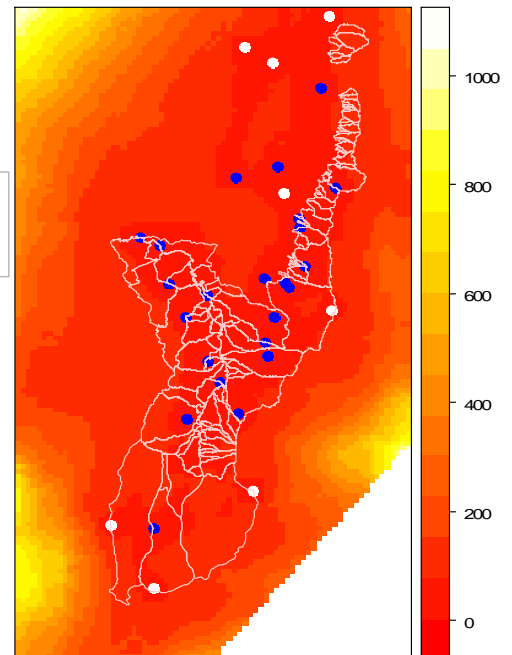
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme



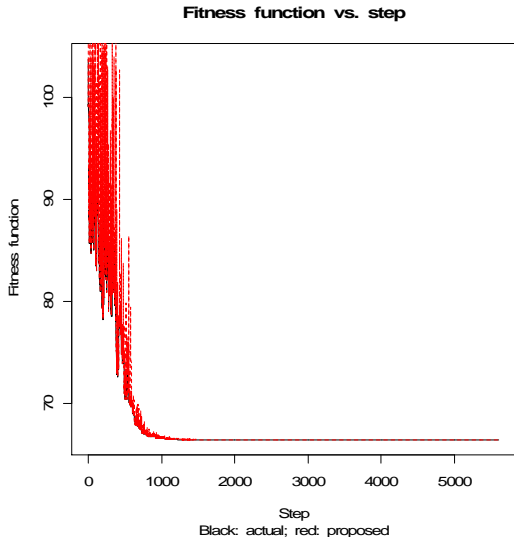
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Mean, max kriging variance: 71.8981 ; 136.0031

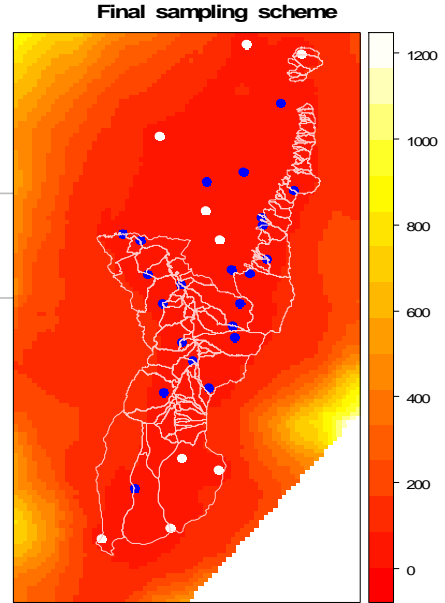
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA RESIDUAL 01-04-09

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

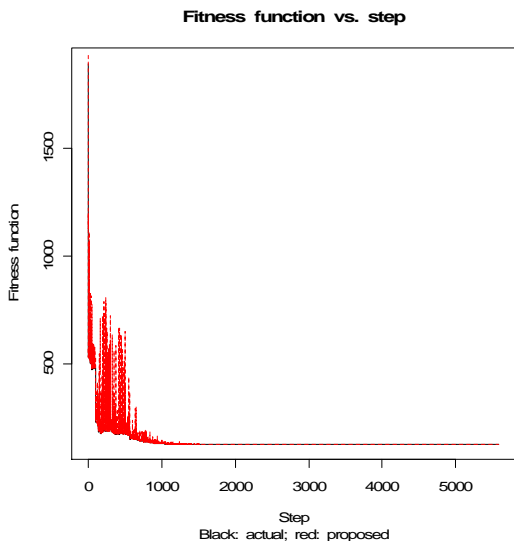


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

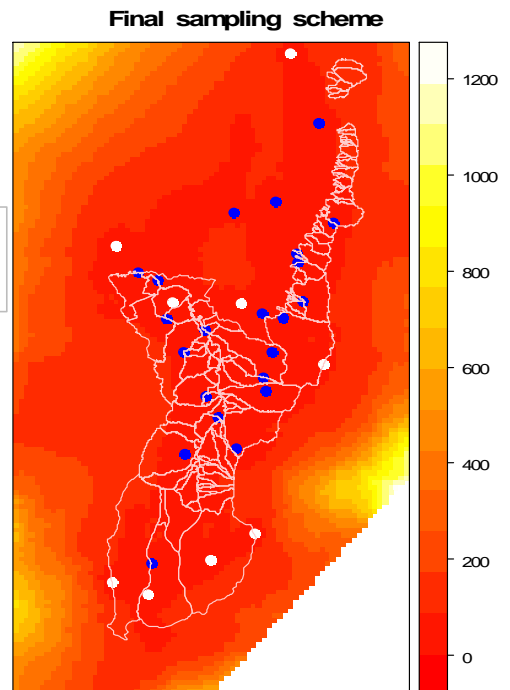


Mean, max kriging variance: 66.4308 ; 158.8197

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



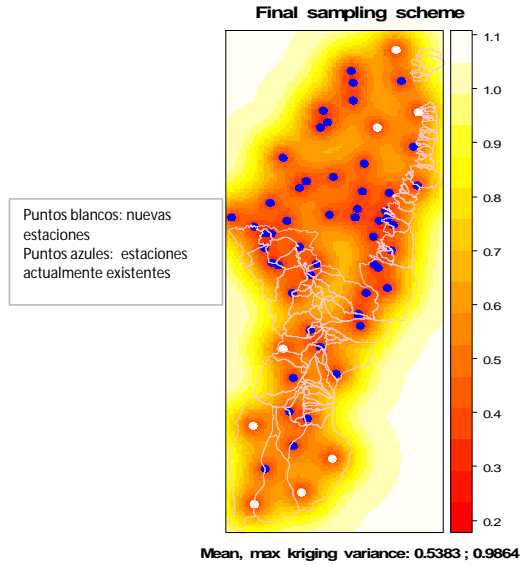
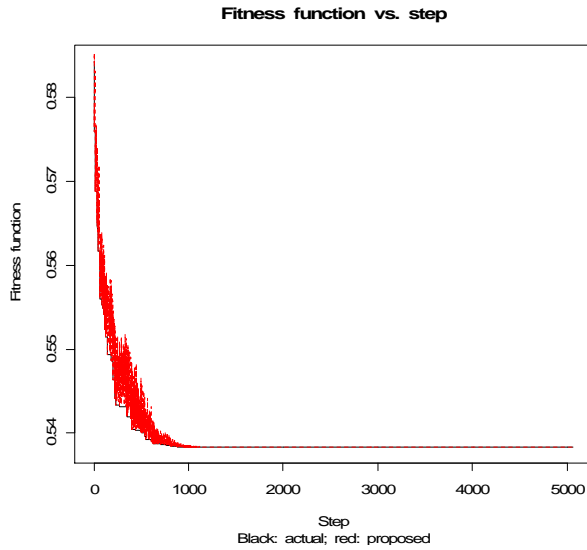
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



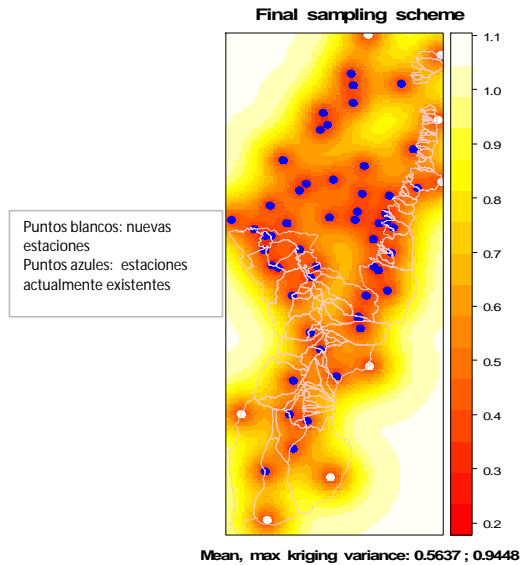
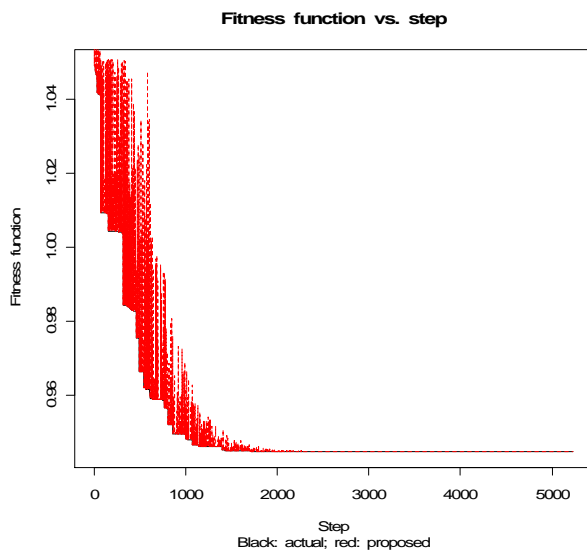
Mean, max kriging variance: 72.4968 ; 126.8311

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

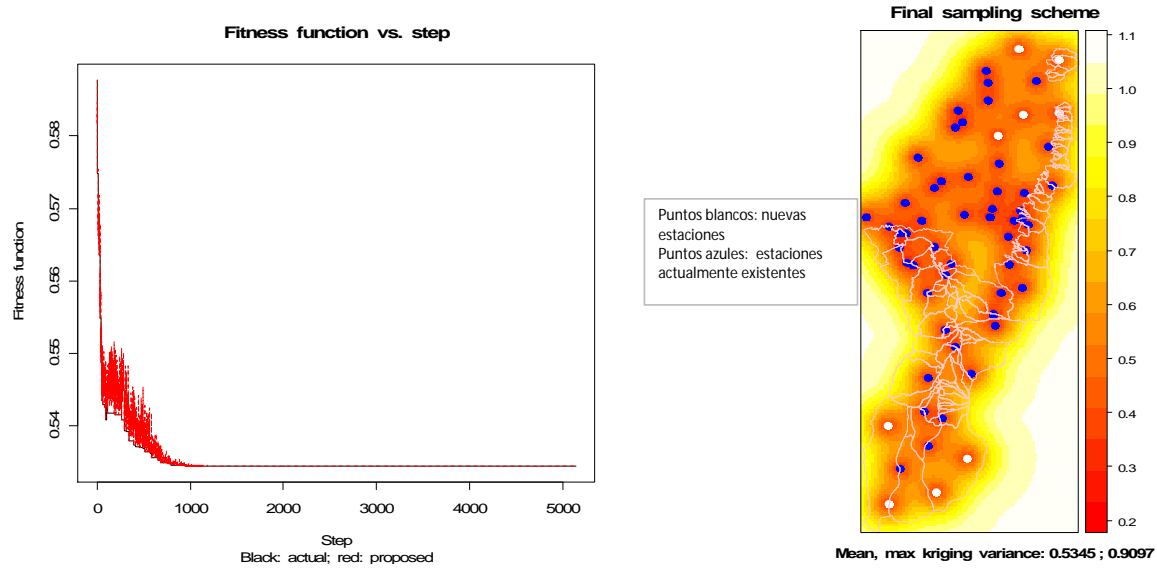


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

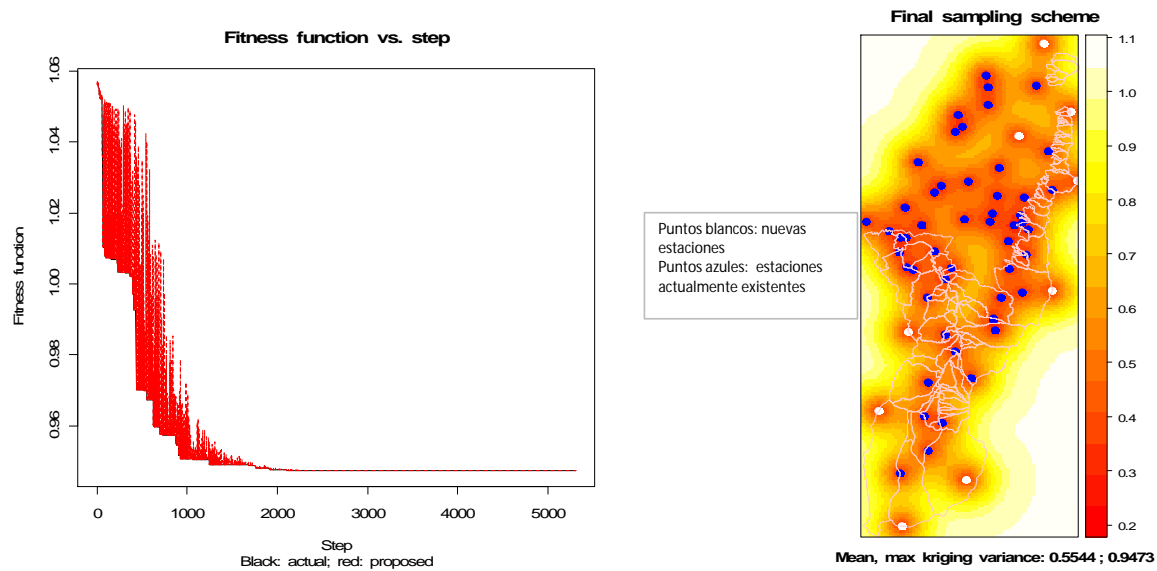
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio



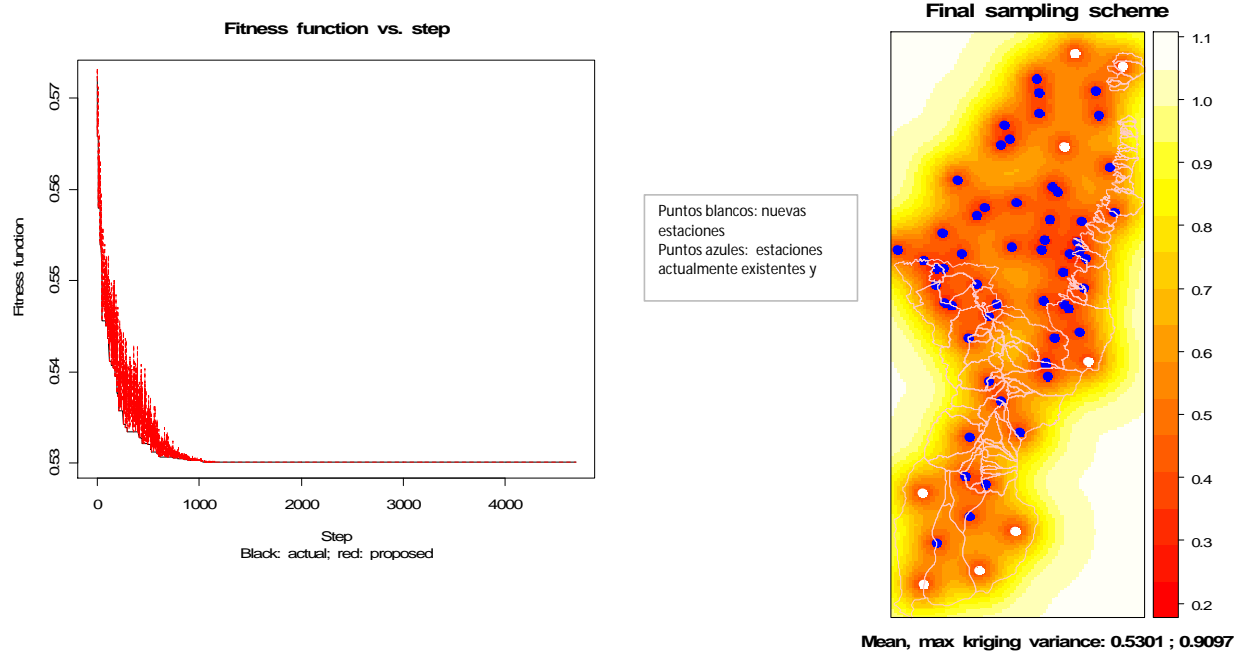
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio

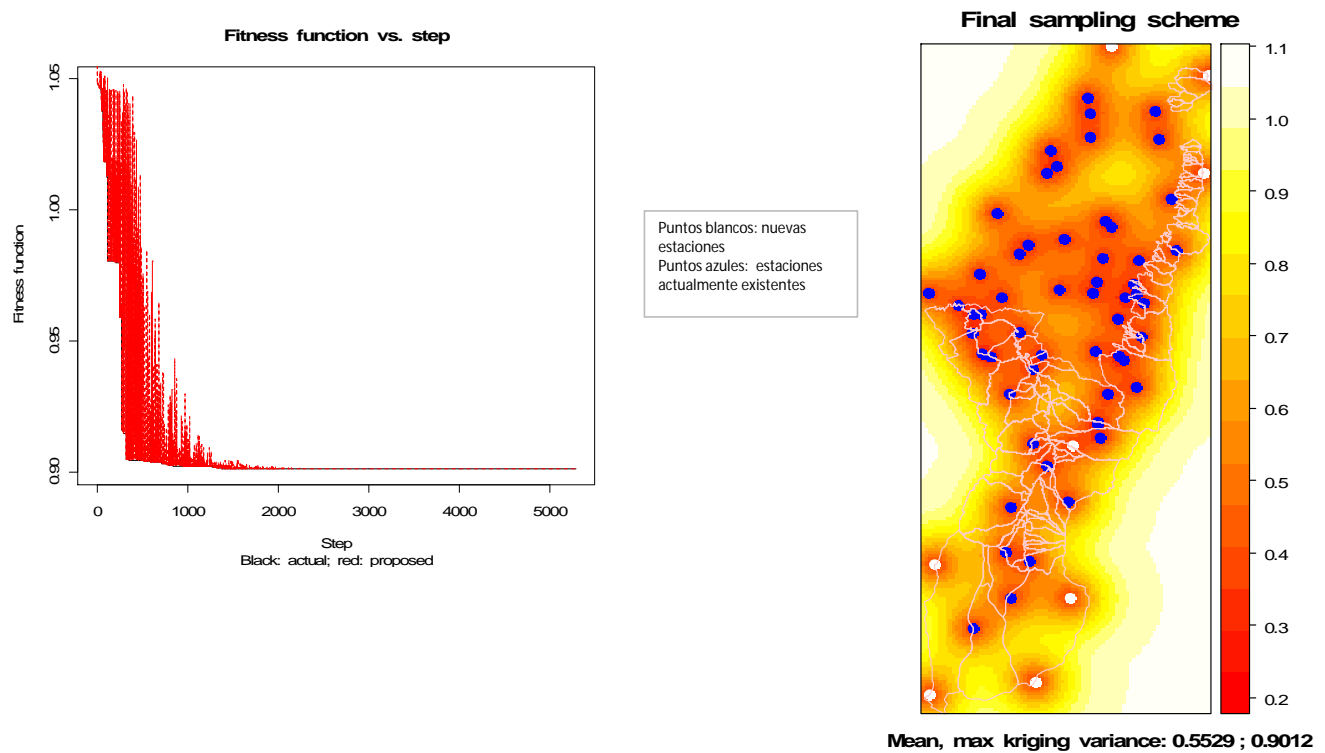


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

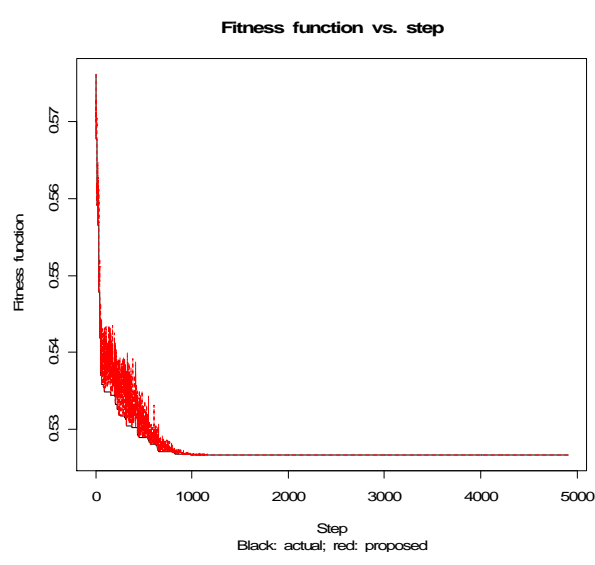


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

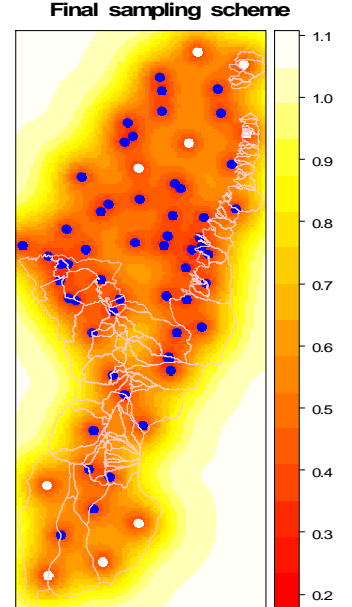


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFERICO
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

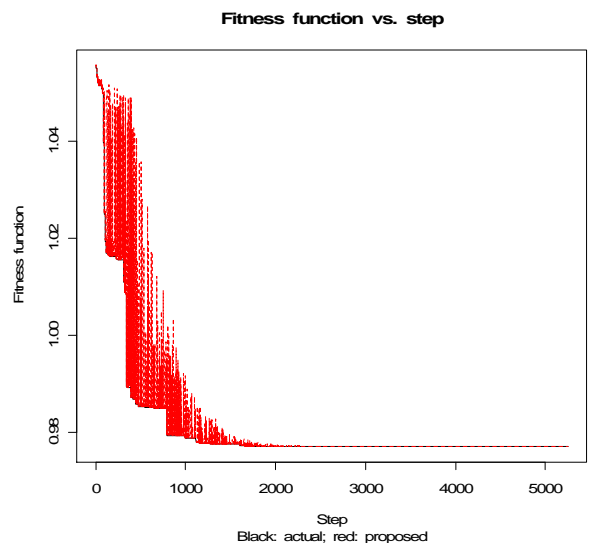


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

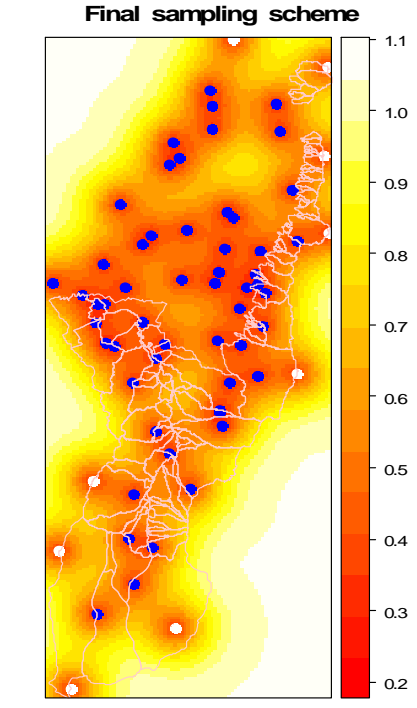


Mean, max kriging variance: 0.5267 ; 0.9096

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



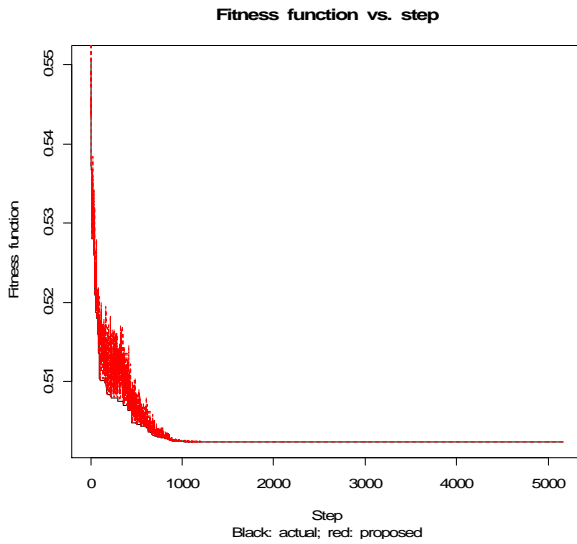
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



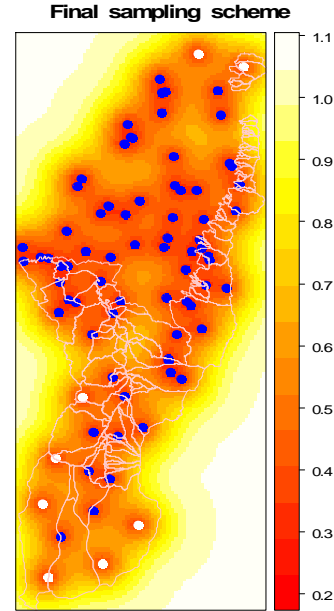
Mean, max kriging variance: 0.5518 ; 0.9771

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

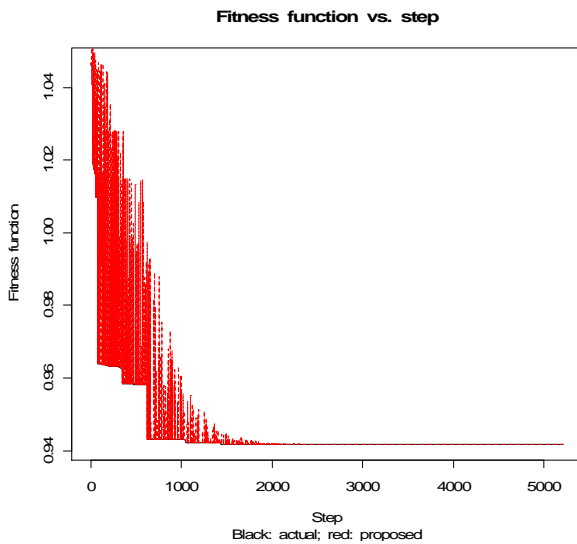


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

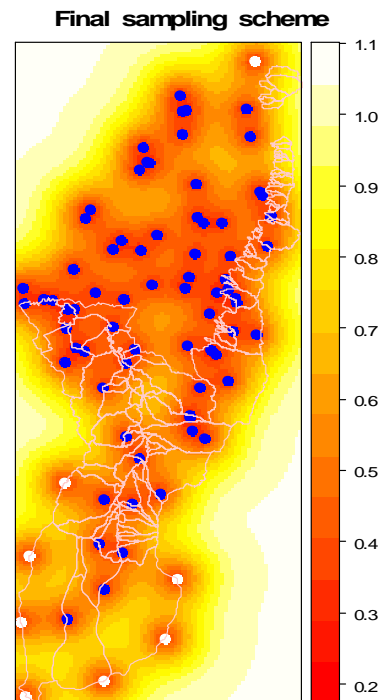


Mean, max kriging variance: 0.5023 ; 0.9004

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



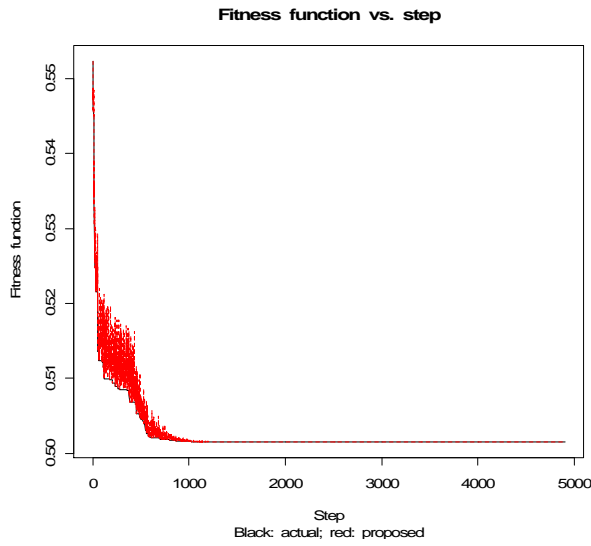
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



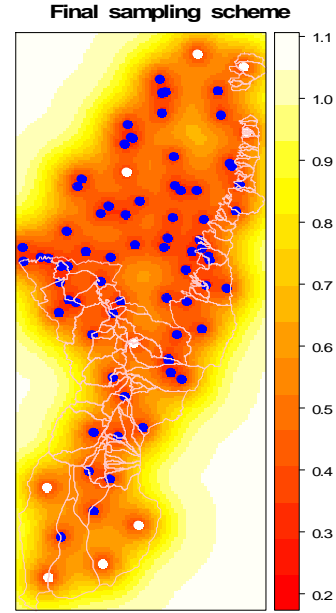
Mean, max kriging variance: 0.5205 ; 0.9417

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

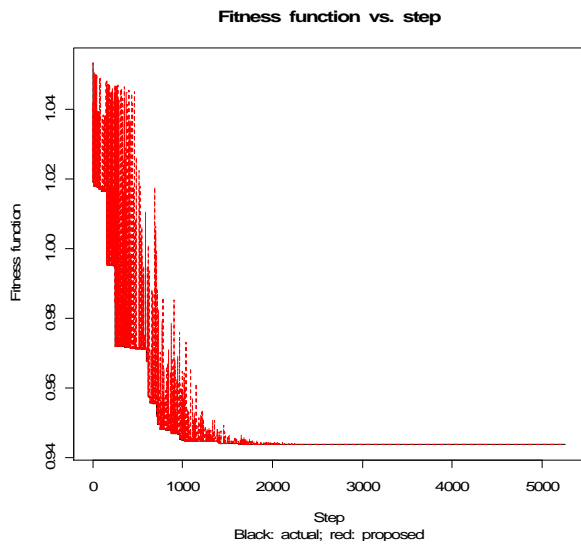


Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

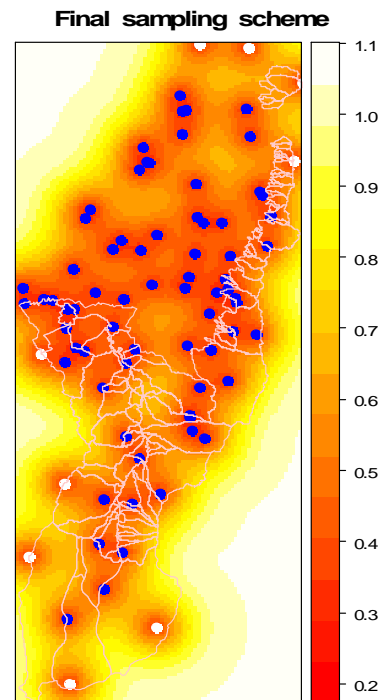


Mean, max kriging variance: 0.5015 ; 0.9064

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



Mean, max kriging variance: 0.5215 ; 0.9438

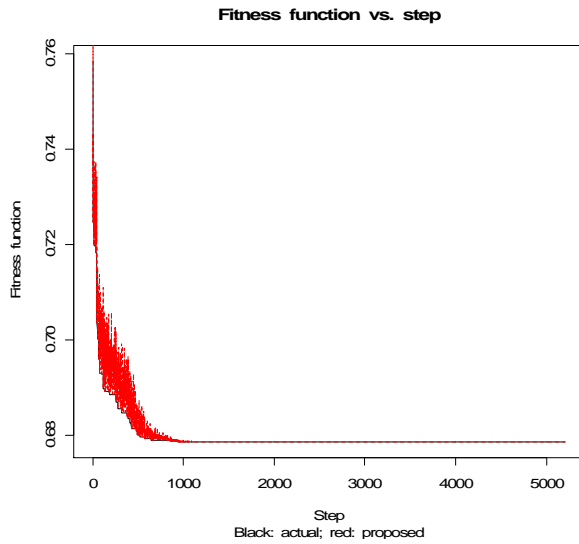
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO

ESCENARIO:

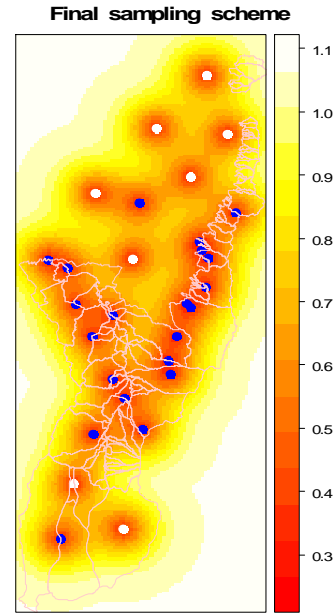
8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio



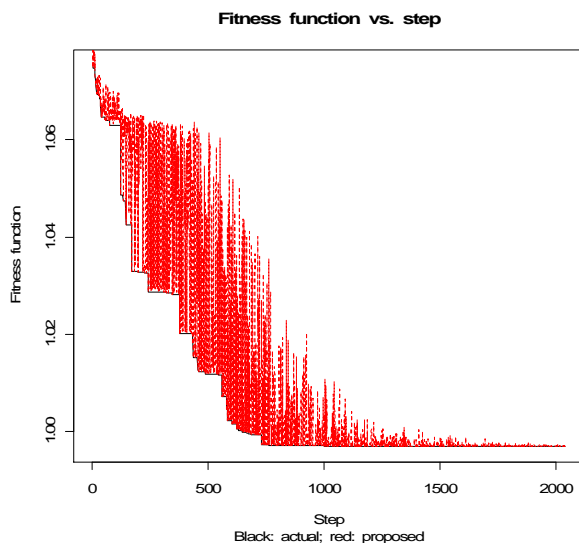
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



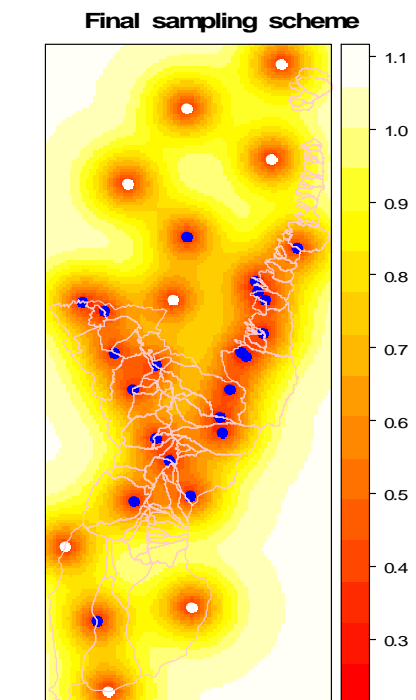
Mean, max kriging variance: 0.6787 ; 1.065

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



Mean, max kriging variance: 0.7123 ; 0.997

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO

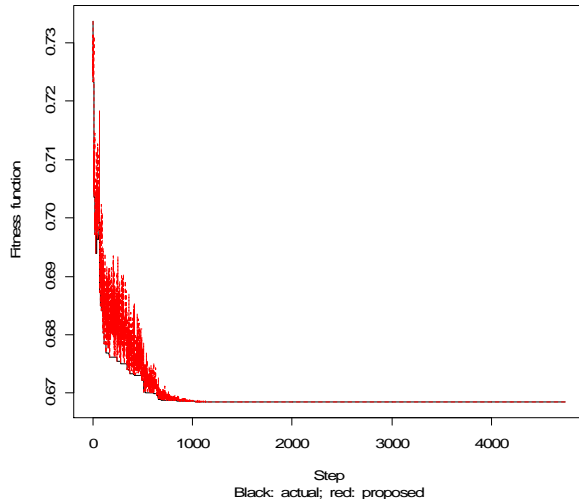
ESCENARIO:

9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

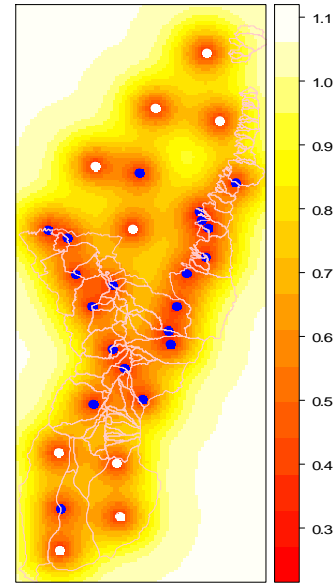
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme



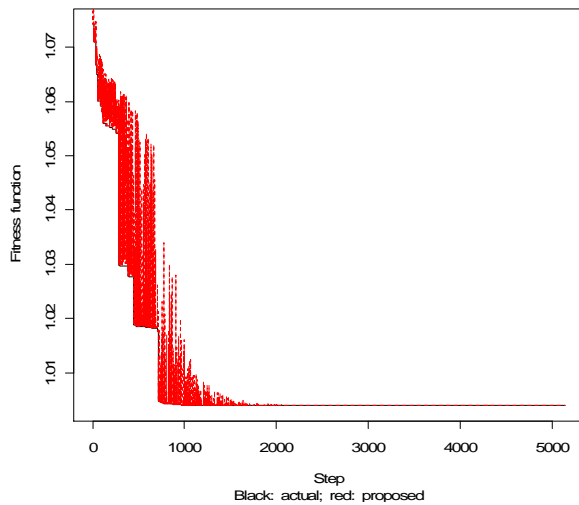
Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Mean, max kriging variance: 0.6685 ; 1.0378

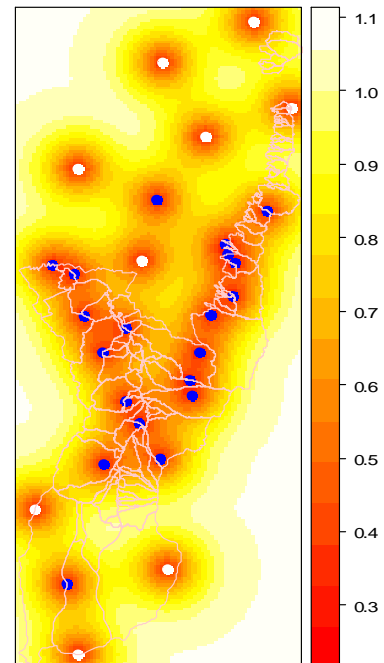
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Final sampling scheme



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Mean, max kriging variance: 0.7084 ; 1.0039

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO

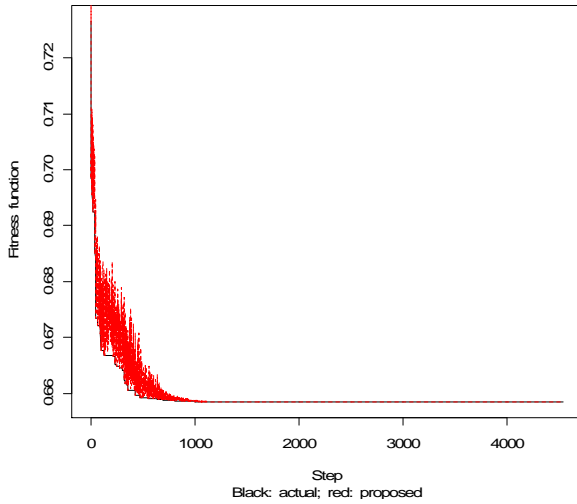
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

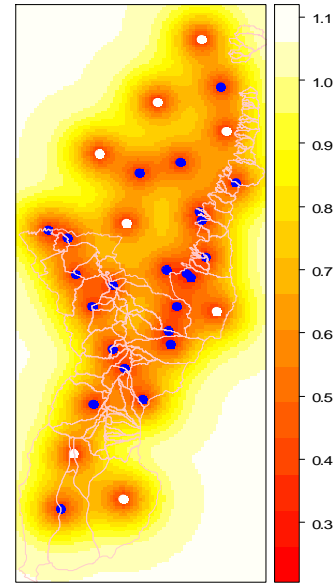
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

Final sampling scheme

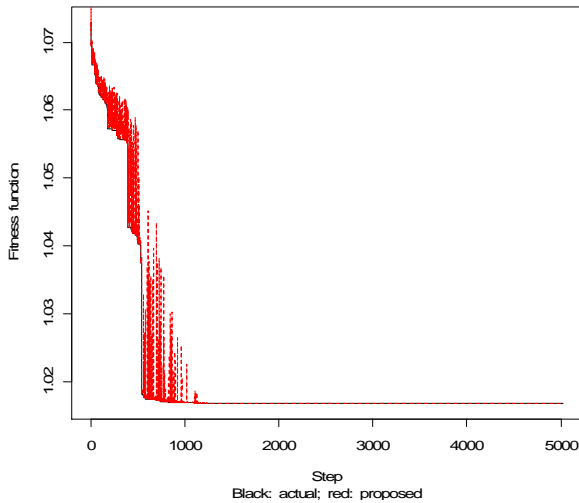


Mean, max kriging variance: 0.6584 ; 1.0626

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

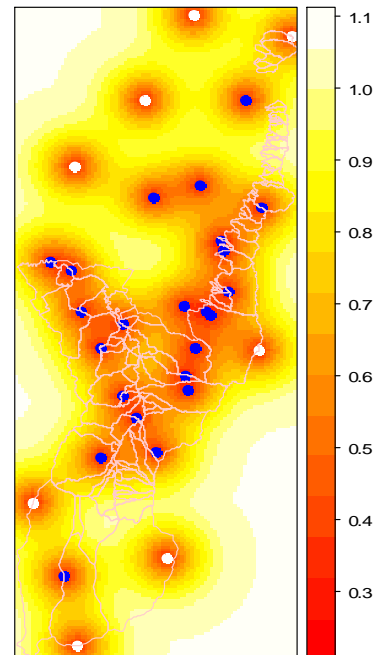
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

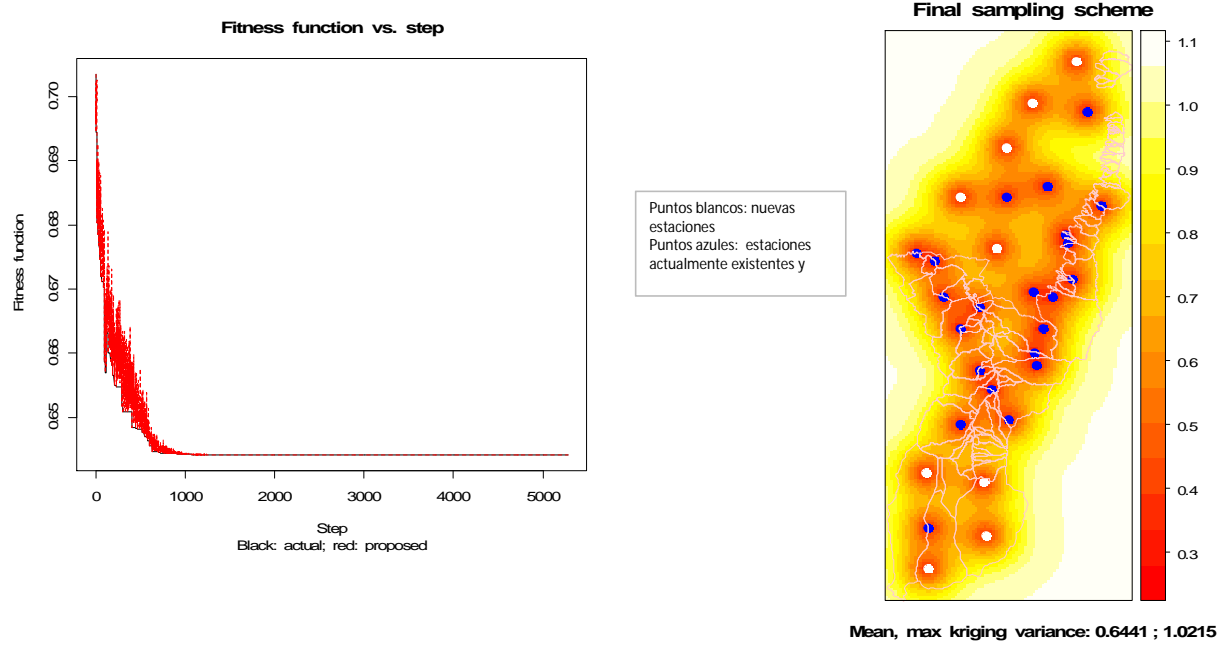
Final sampling scheme



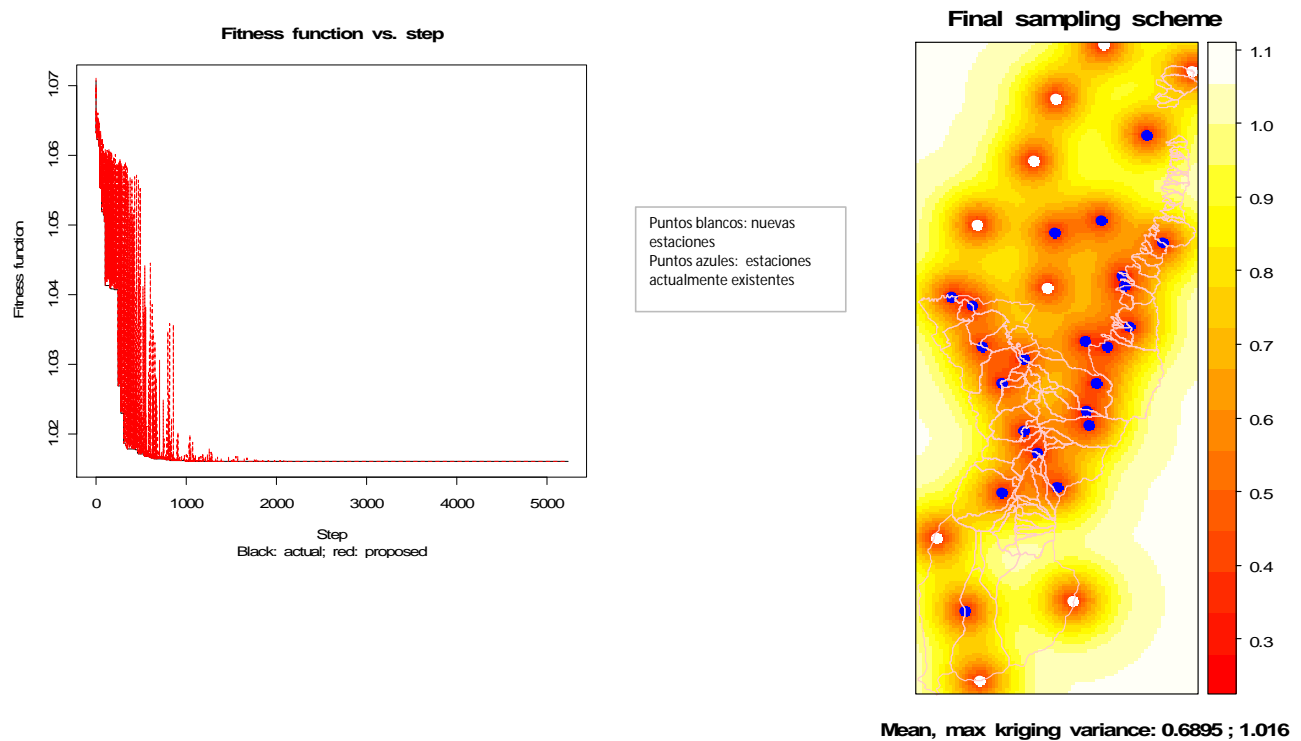
Mean, max kriging variance: 0.7059 ; 1.0168

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA CLIMATOLÓGICO ESFÉRICO
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

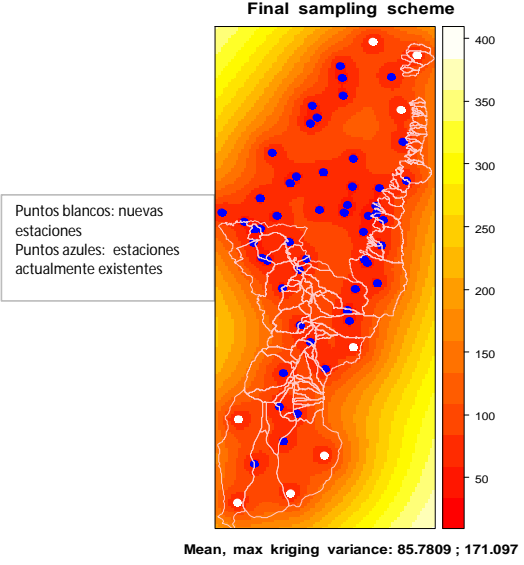
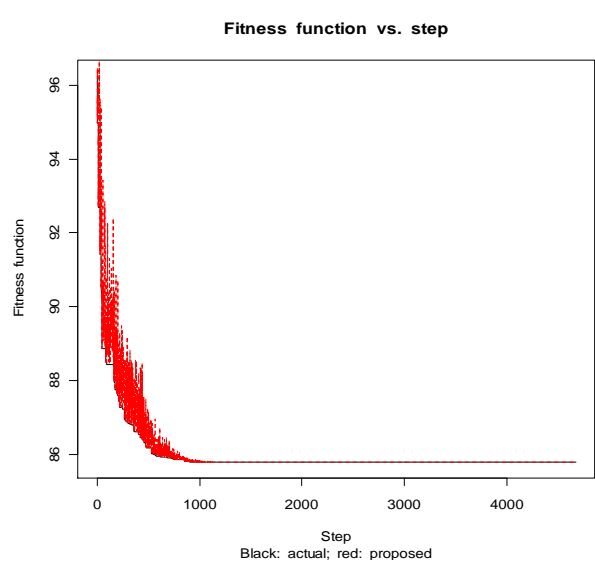


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

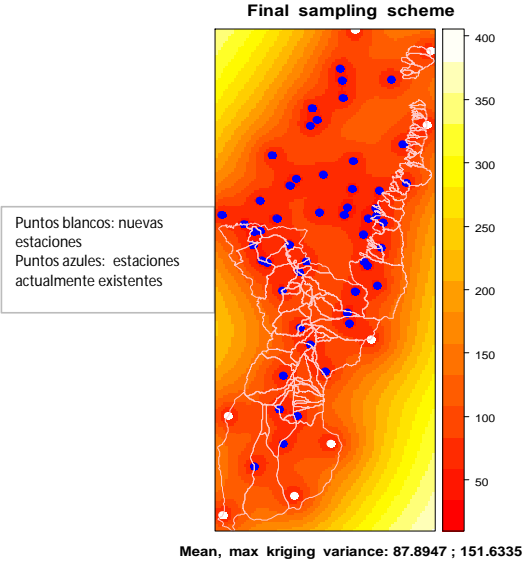
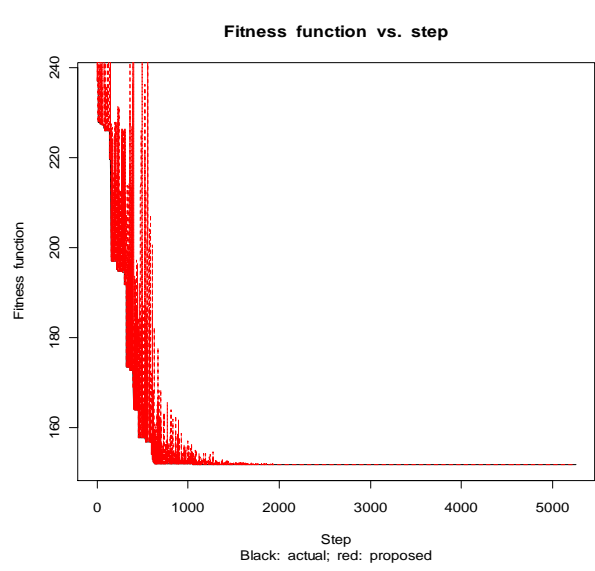


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



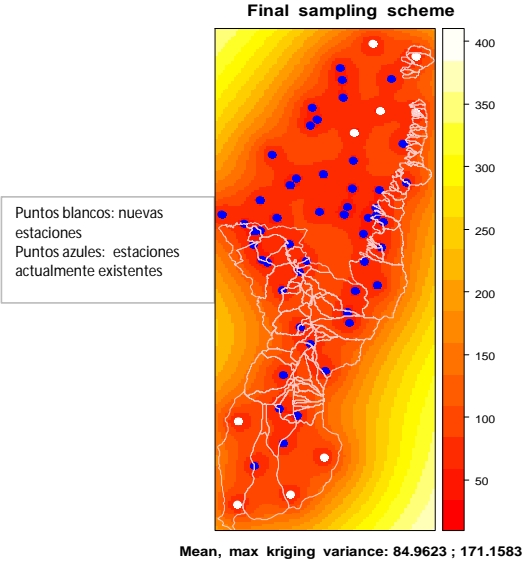
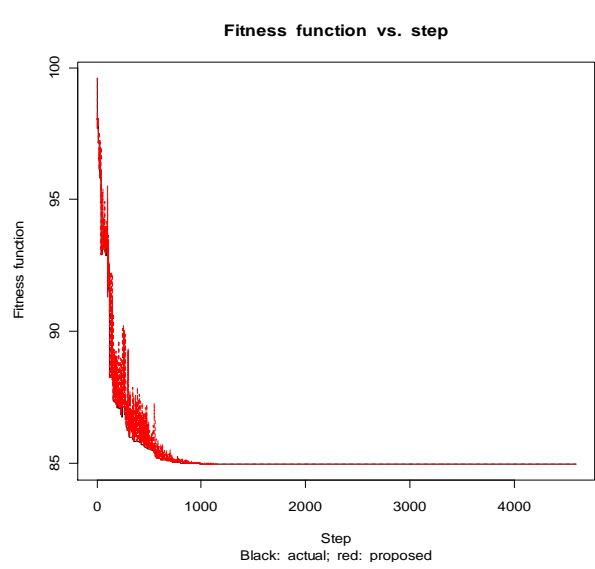
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



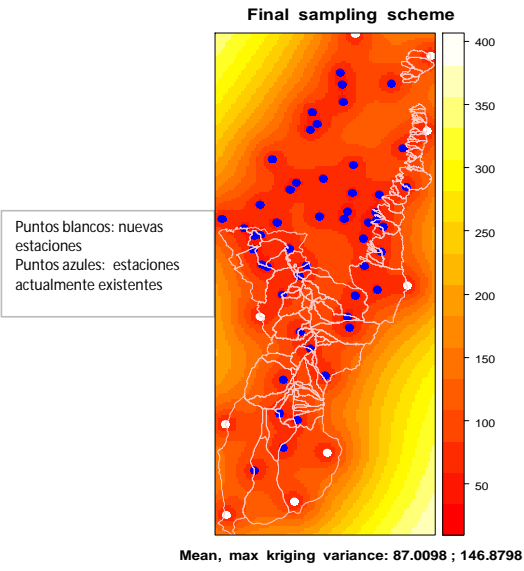
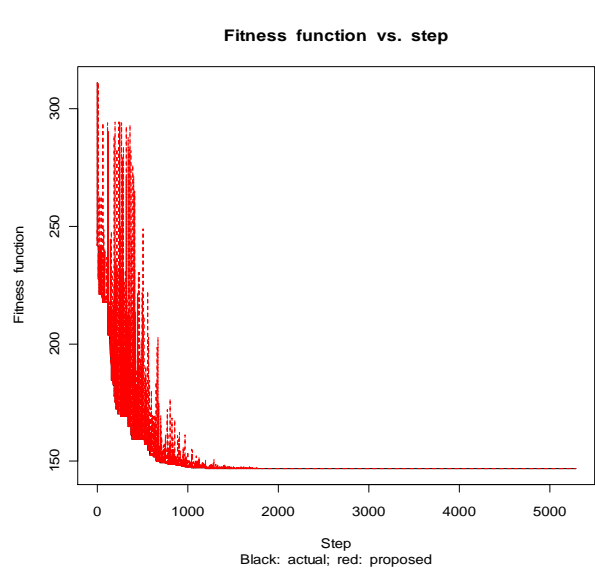
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM)

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



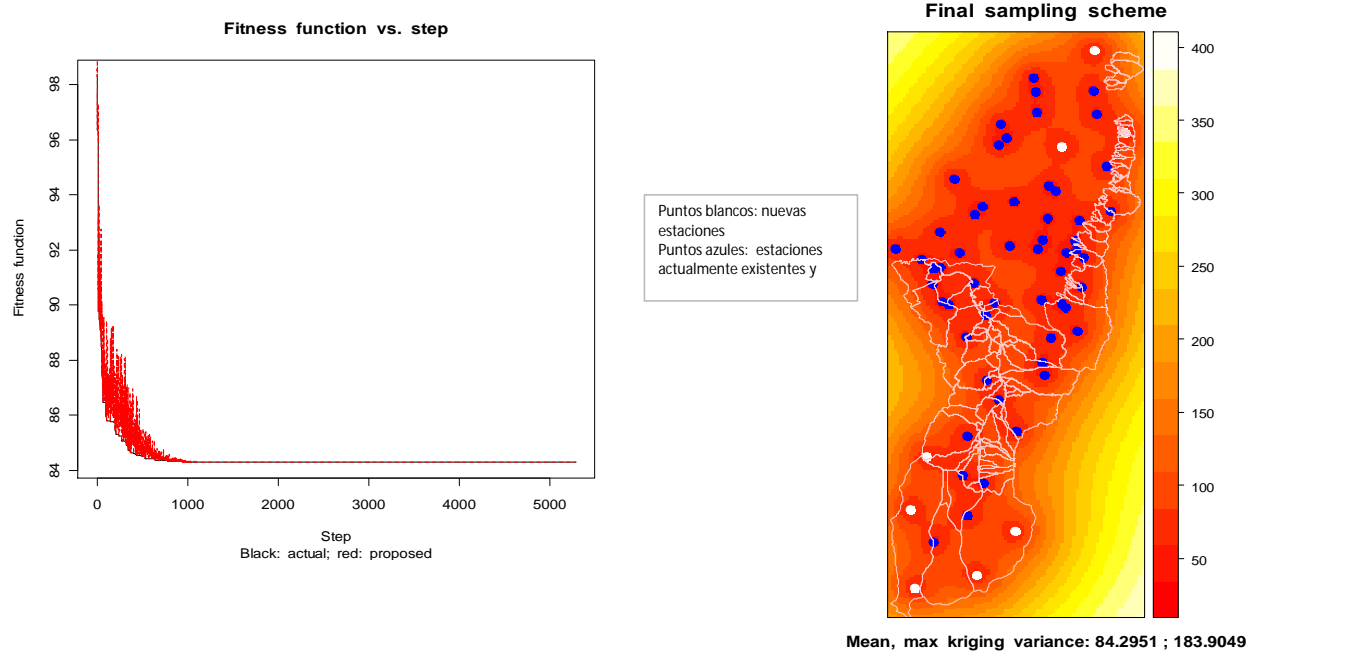
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio



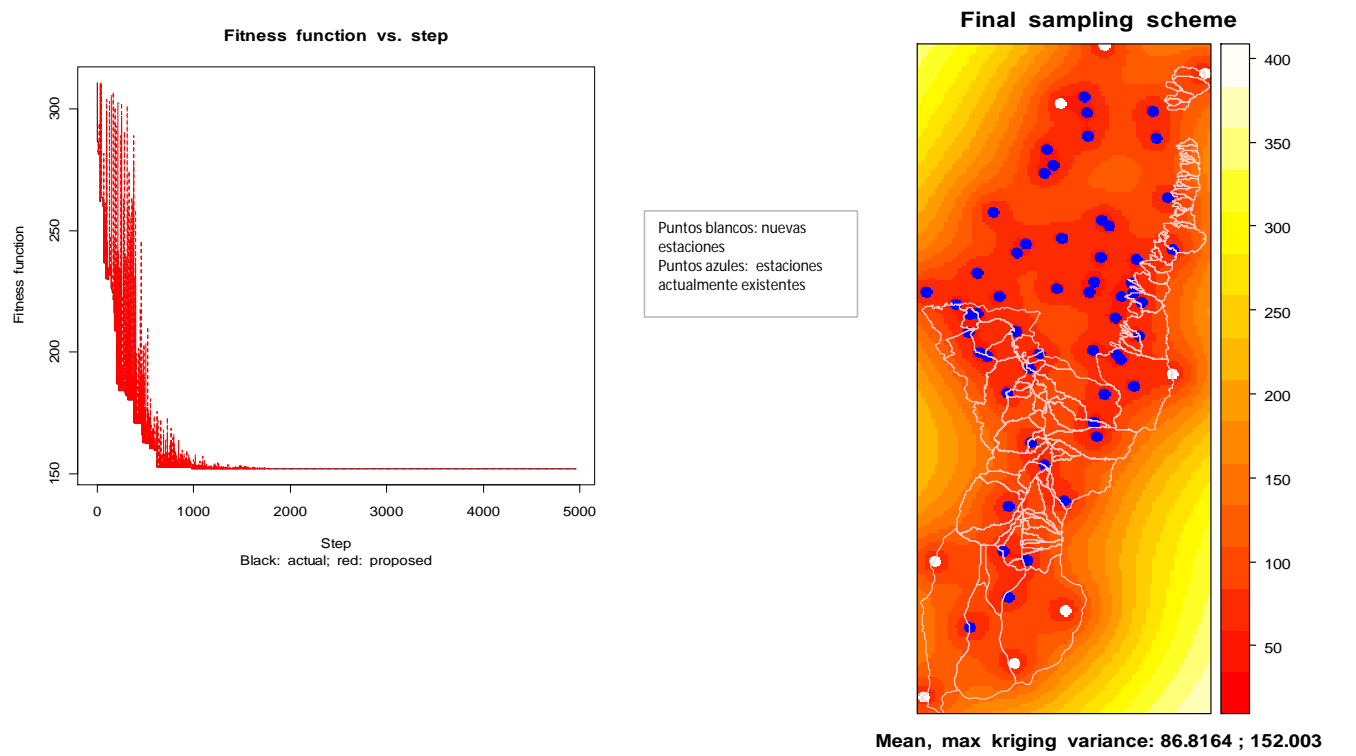
OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza media en el área de estudio

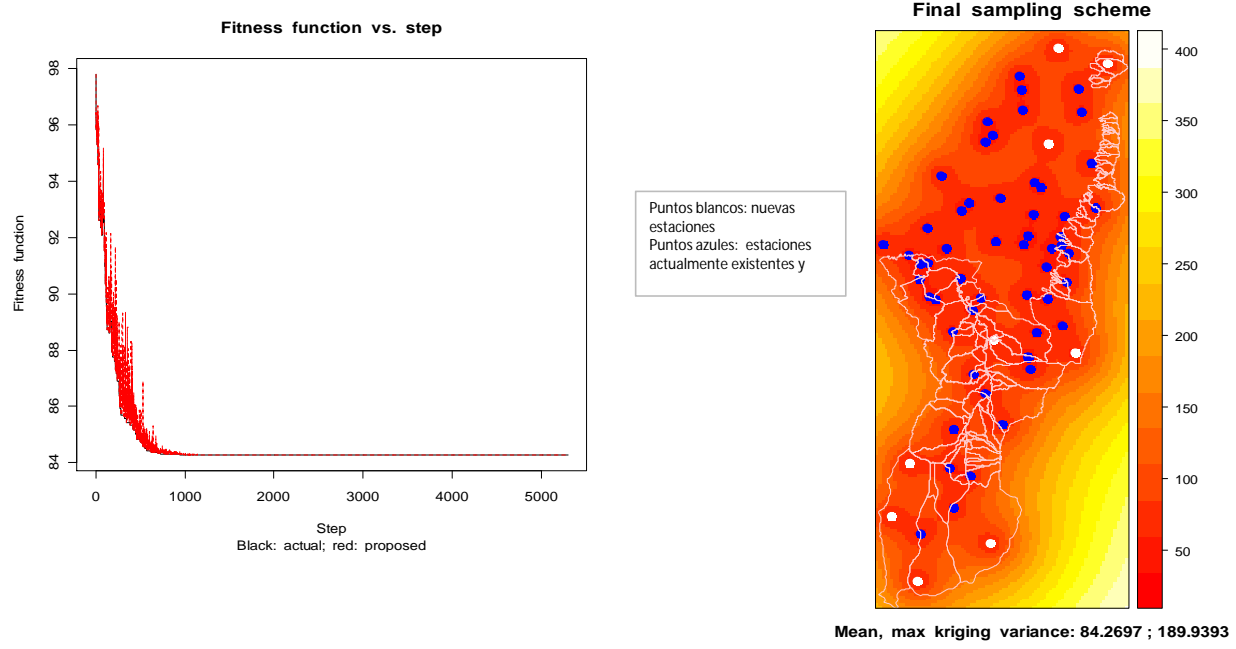


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN: Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

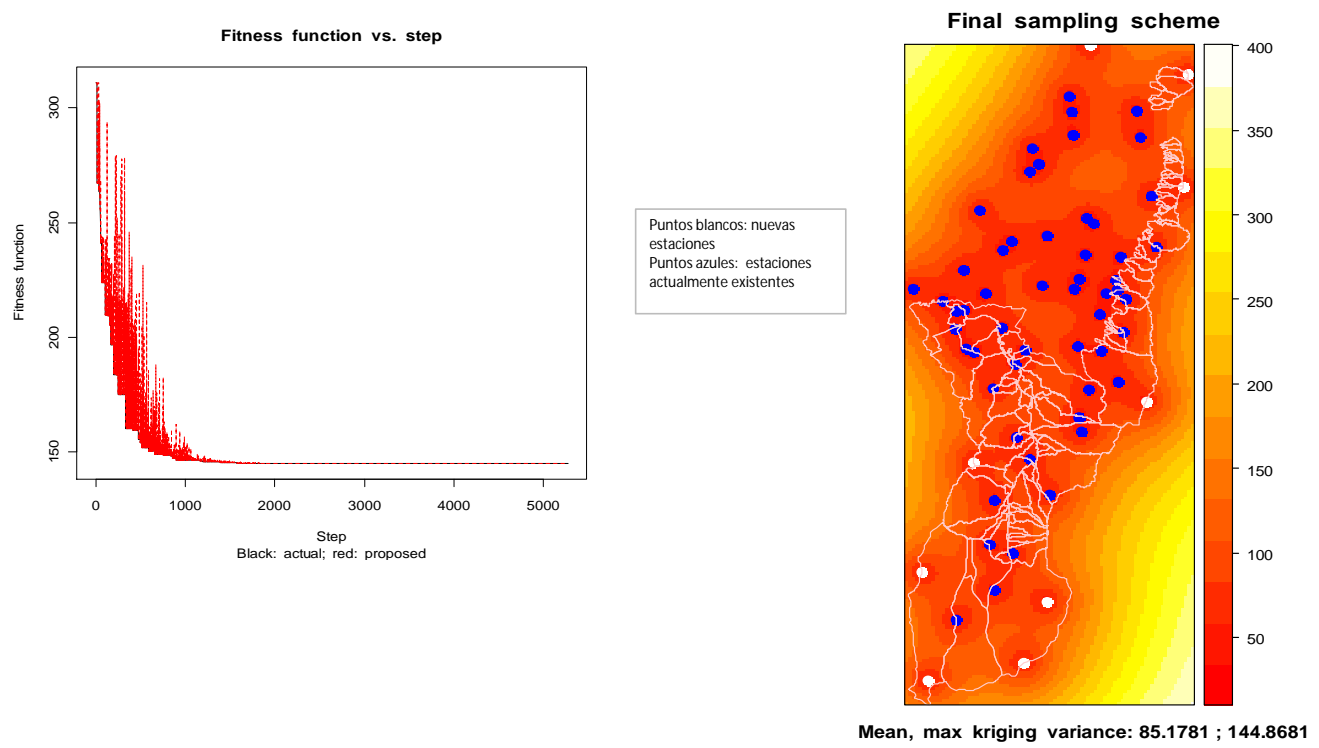


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio

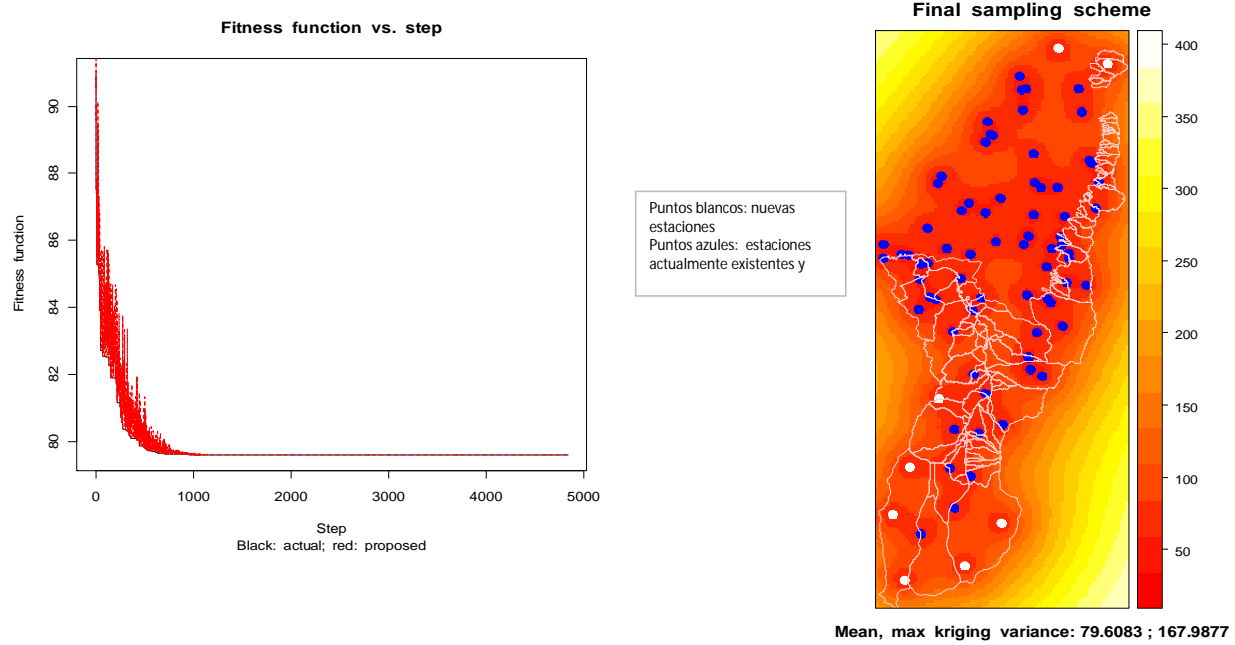


CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

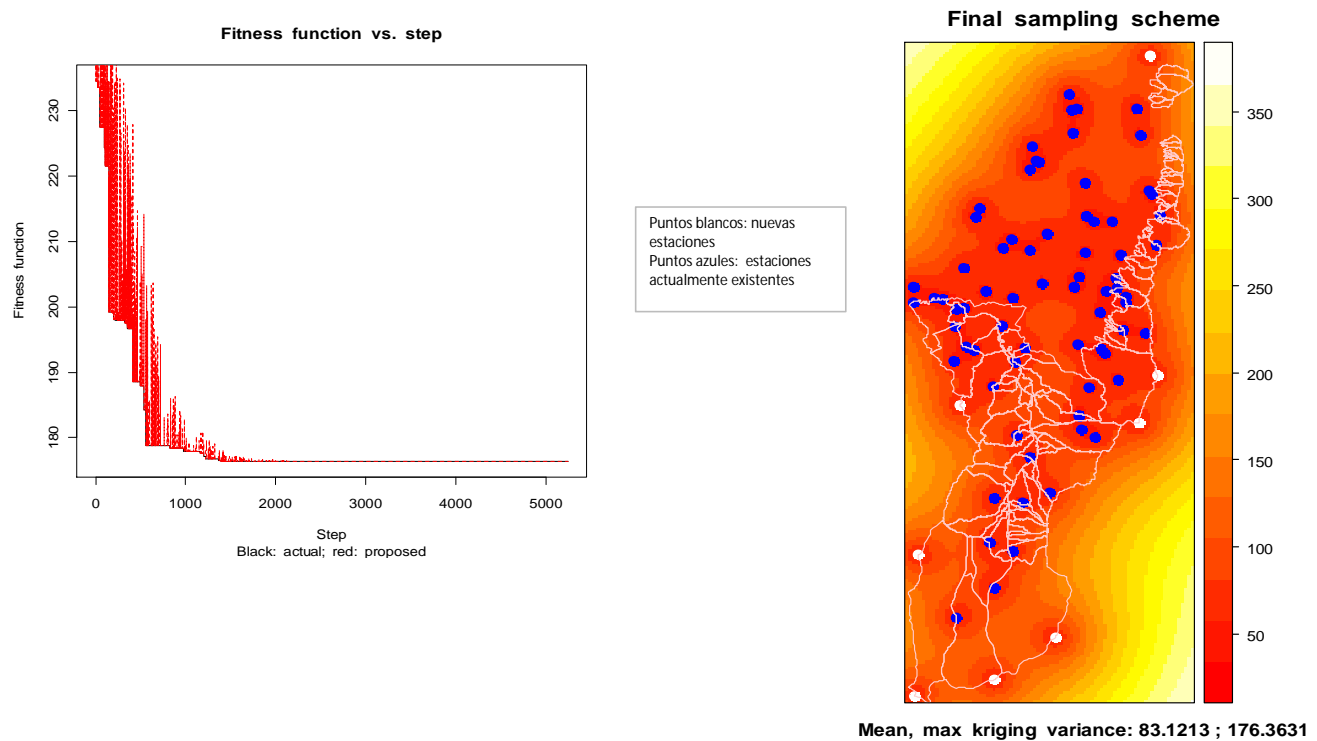


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09
ESCENARIO: 8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

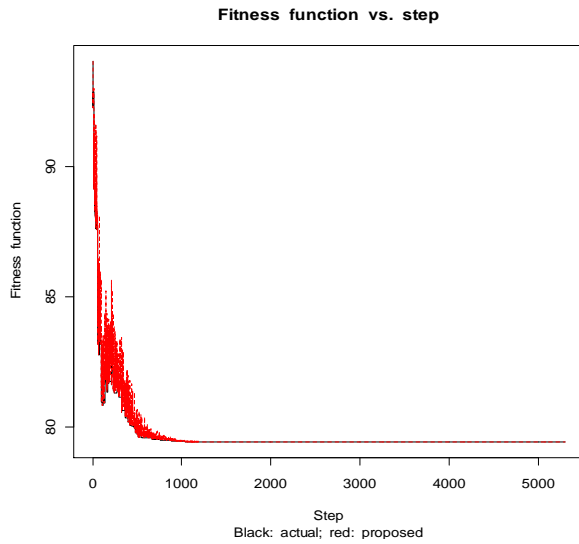


OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente -estación Logística susceptible de relocalización-, considerando las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM), considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE y estaciones proyectadas EAAB.

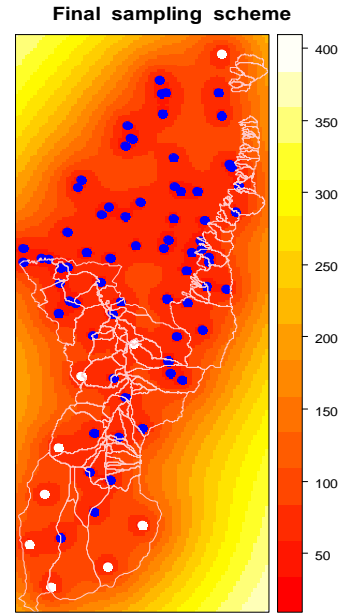
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza media en el área de estudio



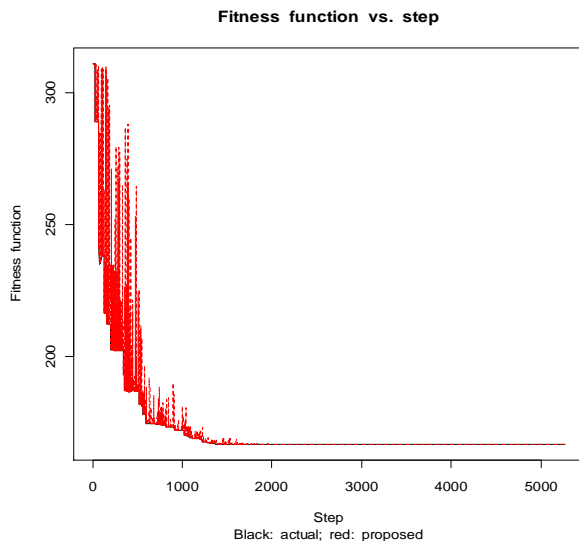
Puntos blancos: nuevas estaciones

 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y



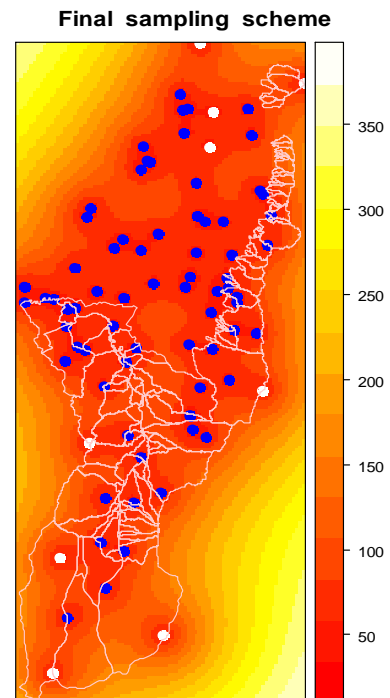
CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



Puntos blancos: nuevas estaciones

 Puntos azules: estaciones actualmente existentes



OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

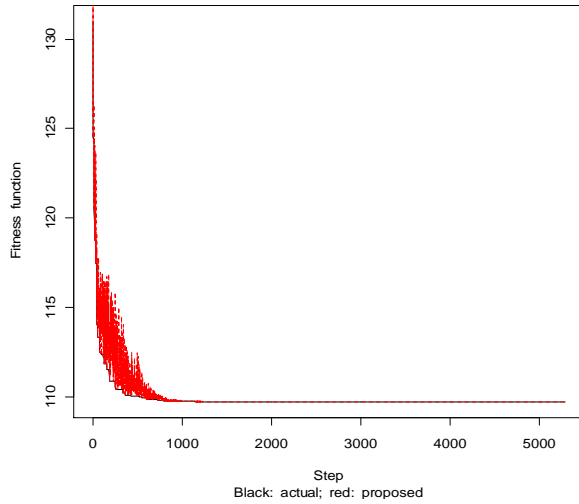
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

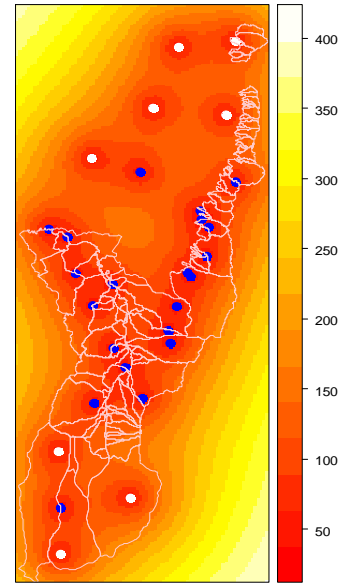
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme

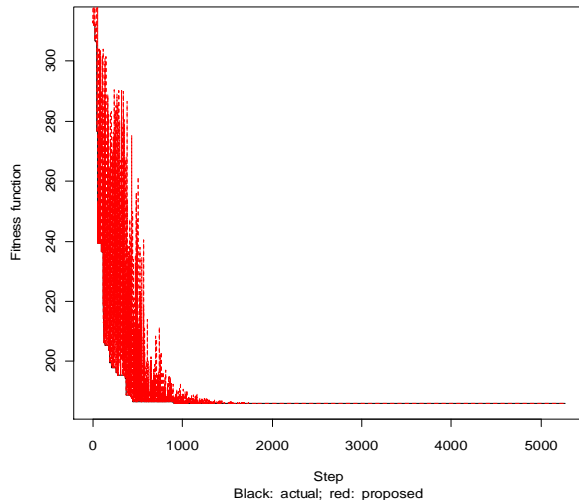


Mean, max kriging variance: 109.7278 ; 201.451

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

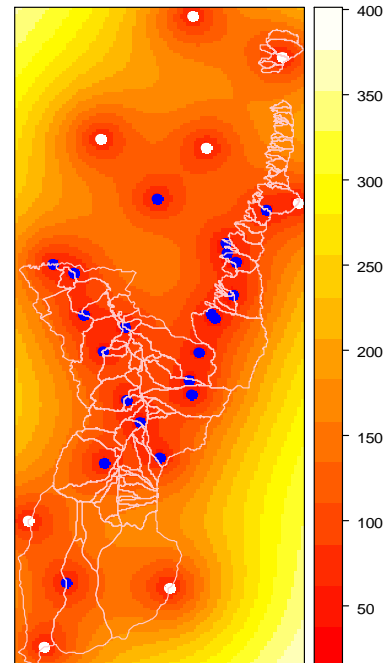
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 117.3328 ; 185.9743

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

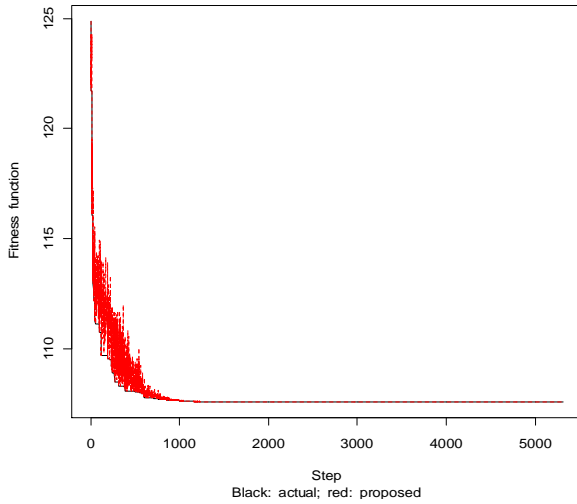
ESCENARIO:

9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM).

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

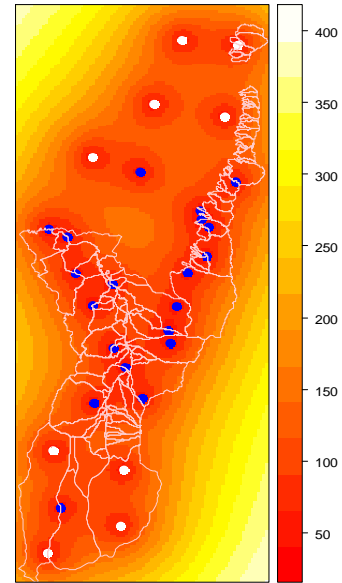
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme

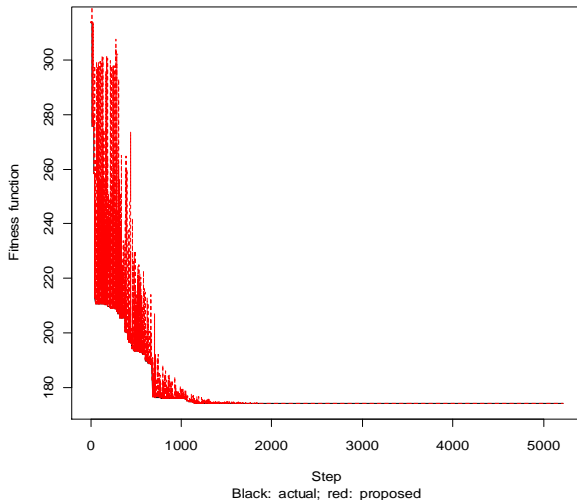


Mean, max kriging variance: 107.5637 ; 189.5508

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

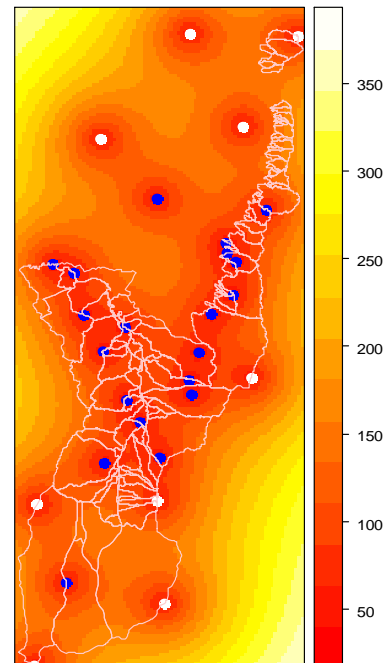
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

Final sampling scheme



Mean, max kriging variance: 115.721 ; 174.1692

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09

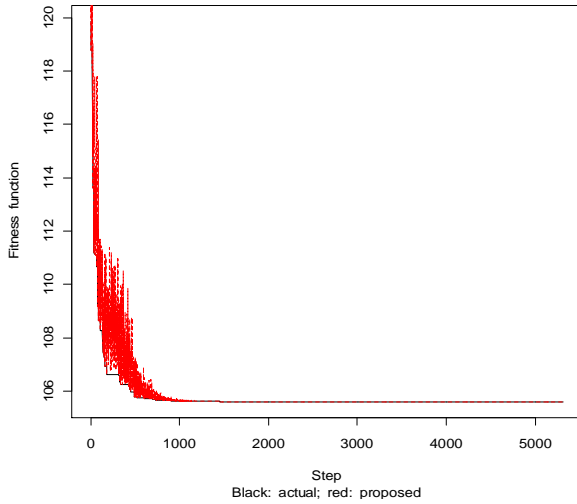
ESCENARIO:

8 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

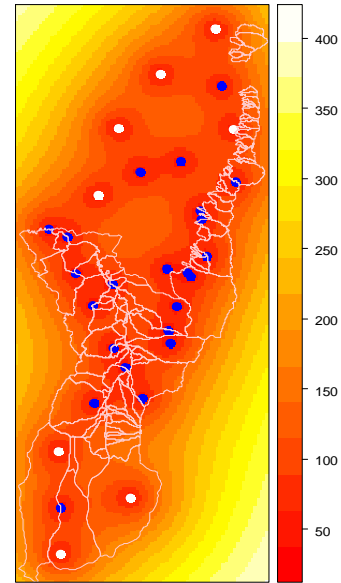
Minimización de la varianza media en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes y

Final sampling scheme

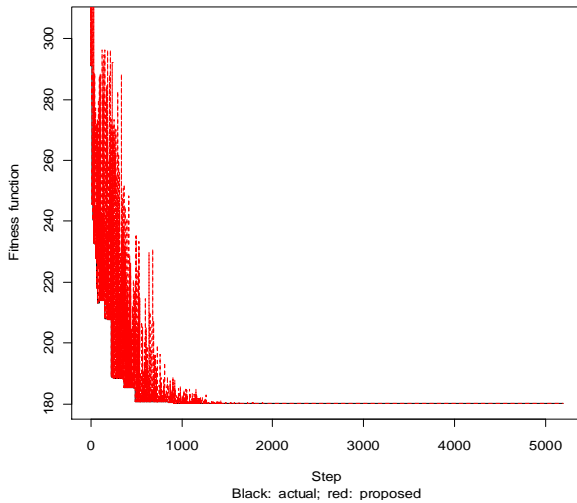


Mean, max kriging variance: 105.5958 ; 204.8427

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

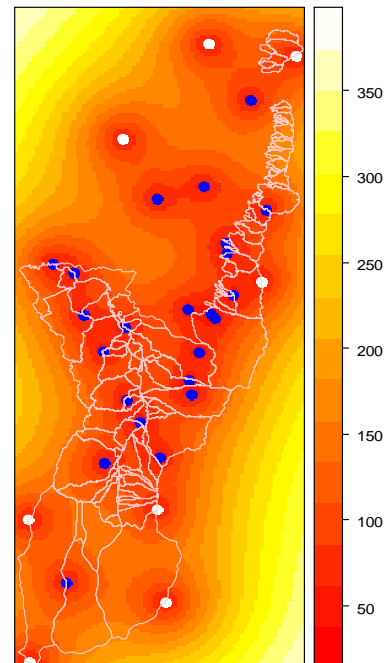
Minimización de la varianza máxima en el área de estudio

Fitness function vs. step



Puntos blancos: nuevas estaciones
 Puntos azules: estaciones actualmente existentes

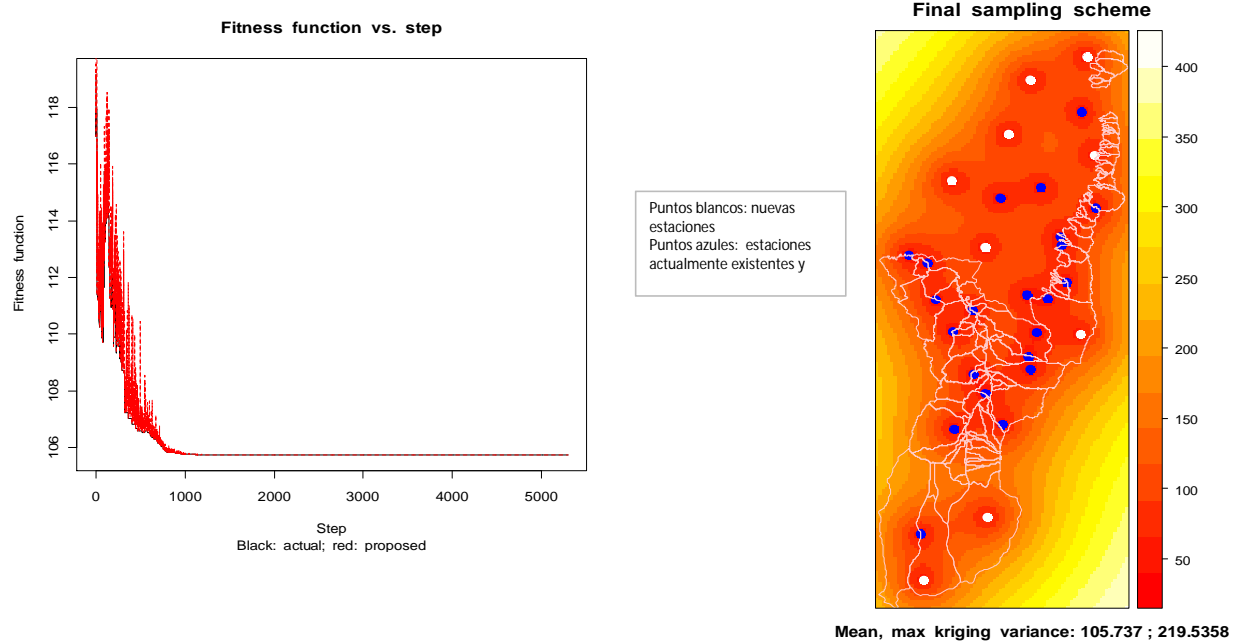
Final sampling scheme



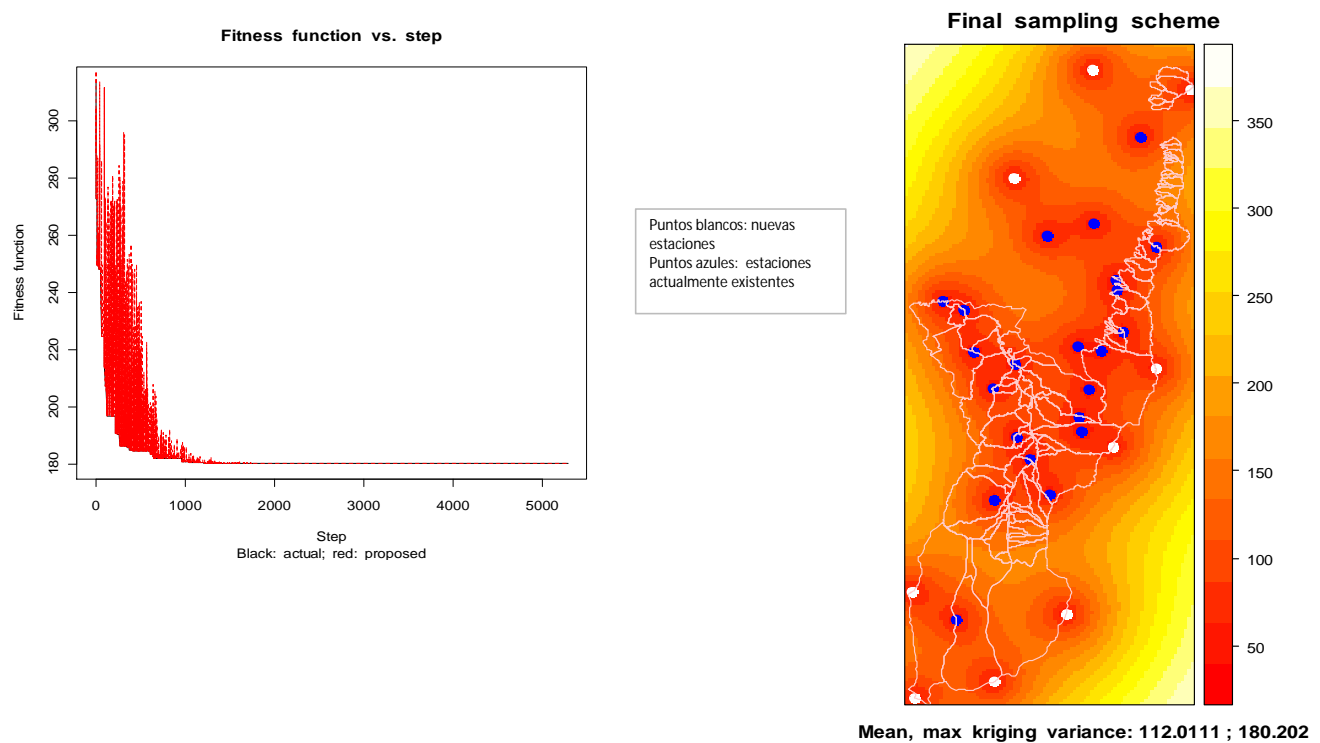
Mean, max kriging variance: 112.1816 ; 180.1161

OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NUEVAS DEL FOPAE - VARIOGRAMA PRECIPITACION DIARIA 01-04-09
ESCENARIO: 9 puntos de monitoreo de precipitación adicionales a la red existente del FOPAE -estación Logística susceptible de relocalización- sin considerar las estaciones existentes de las demás entidades del Distrito (EAAB, FOPAE y SDA e IDEAM) y considerando la localización de 3 estaciones mixtas FOPAE.

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza media en el área de estudio



CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:
 Minimización de la varianza máxima en el área de estudio



ANEXO B. INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE
LOCALIZACIÓN DE SUS ESTACIONES PROYECTADAS

Carolina Rogelis

De: jacopete@acueducto.com.co
Enviado el: Martes, 02 de Noviembre de 2010 05:26 p.m.
Para: Carolina Rogelis
Asunto: Re: RV: Localización nuevas estaciones EAAB
Datos adjuntos: ATT00396.jpg; ATT00399.gif

Cordial Saludo,

Hola Carolina: En este momento no tengo las coordenadas pero la ubicación geográfica aproximada de los lugares es muy sencilla:

Techo : Avenida 1 de mayo una cuadra abajo de la av. Boyacá
Mariscal Sucre : Tanque alto ciudadela Sucre en Soacha
Planta Yomasa : en la estructura de la EAAB
Liceo Cambridge: Km 7 Vía Suba – Cota / Vereda Chorrillos
Cerro de Suba : Tanque EAAB

Lo de la estación elevadora de san Benito lo definieron los operadores de alcantarillado, dado que para ellos la información de la DPAE no está disponible.

las HMT tendrán registro de precipitación en tiempo real , pero está información no será publicada en el portal web

Me avisas cualquier cosa

Ciao

Atentamente,

James Copete
Ing. Hidrología Básica
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)
Tel: +57 (1) 3447819
Cel: +57 3153185161

"Carolina Rogelis" <crogelis@fopae.gov.co>

02/11/2010 03:25 p.m.

Para <jacopete@acueducto.com.co>
cc <leonardoguayara@gmail.com>
Asunto RV: Localización nuevas estaciones EAAB

Hola James,

Recuerdas el correo que te adjunto que te envié en julio? Bueno... ya vamos a elegir los nuevos sitios de estaciones entonces del listado que tu me mandaste hay varias estaciones que no he podido localizar, estas son: Techo, Mariscal Sucre, Planta Yomasa (la localicé aproximada pero sería mejor que me corroboraras las coordenadas), Cambridge School y Cerro de Suba. En todo caso si ya tienes las coordenadas de todas te agradecería mucho que me enviaras esta información. Aprovecho también para comentarte que en la lista que me enviaste aparece una estación RIO TUNJUELO SAN BENITO, el FOPAE tiene una estación en San Benito

que toma datos de nivel cada 5 minutos y registra precipitación cada 10. Te comento esto debido a que me enteré que existe un hallazgo de la contraloría debido a que existen estaciones de varias entidades localizadas en el mismo punto.

También te quería preguntar si todas las estaciones que en la lista están marcadas como HMT van a tener registro de precipitación en tiempo real también.

Muchas gracias!

María Carolina Rogelis
Profesional especializado - Grupo de Estudios
Coordinación de Investigación y Desarrollo
Área Técnica y de Gestión
Fondo de Prevención y Atención de Emergencias
Secretaría de Gobierno - Alcaldía Mayor de Bogotá
✉ *Diagonal 47 # 77 A – 09 Interior 7*
☎ *Tel. (571) 4297414 ext. 2902*
Fax. (571) 4292833
Email: crogelis@fopae.gov.co
www.fopae.gov.co
www.sire.gov.co



De: Carolina Rogelis [mailto:crogelis@fopae.gov.co]
Enviado el: Jueves, 08 de Julio de 2010 09:26 a.m.
Para: 'jacopete@acueducto.com.co'
CC: 'jrosas@fopae.gov.co'
Asunto: RE: Localización nuevas estaciones EAAB

Muchas gracias James,

En los próximos días trataré de ubicar el área aproximada en donde se instalarían las estaciones para tenerlas en cuenta y no localizar las nuestras allí.

María Carolina Rogelis Prada
Profesional Especializado – Grupo Estudios

Coordinación de Investigación y Desarrollo
Área Técnica y de Gestión
Dirección de Prevención y Atención de Emergencias
Diag. 47 No. 77A – 09 Int. 11
Tel. (571) 429 2801 ext. 2902
Bogotá – Colombia
www.fopae.gov.co
www.sire.gov.co

De: jacopete@acueducto.com.co [mailto:jacopete@acueducto.com.co]

Enviado el: Miércoles, 07 de Julio de 2010 06:54 p.m.

Para: Carolina Rogelis

Asunto: Re: Localización nuevas estaciones EAAB

Cordial Saludo,

Hola Carolina: Lamento darte respuesta tan tarde ,pero estuve en campo unos días y ando con varias cosas pendientes.

espero que esto te sirva
me cuentas

Ciao!

Identificación		Tipo*
No.	Nombre	
1	Techo	CO
2	Mariscal Sucre (Soacha)	CO
3	Planta Yomasa	CO
4	Río Bogotá Navara	HMT
5	Río Bogotá PTAR	HMT
6	Río Tunjuelo Grancolombiano	HMT
7	Río Tunjuelo San Benito	HMT
8	Río Tunjuelo Puente La Isla	HMT
9	Río Fucha – Entre la avenida 68 y la avenida ciudad de Cali	HMT
10	Cambridge School	PG
11	Laboratorios La Hormona	PG
12	Contador	PG
13	Olarte	PG
14	Camavieja	PG
15	Modelia (centro de control)	PG
16	Cerro de Suba	PG
17	Usaquen Santa Ana	PG
18	El Granizo	PG
19	Salitre Km. 9	PG

Atentamente,

James Copete
Ing. Hidrología Básica
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)
Tel: +57 (1) 3447819
Cel: +57 3153185161

"Carolina Rogelis" <crogelis@fopae.gov.co>

Para <jacopete@acueducto.com.co>

CC

28/06/2010 03:59 p.m.

Asunto Localización nuevas estaciones EAAB

Hola James!

Quisiera molestarte con algo, sería posible que me regalaras la localización con coordenadas de las nuevas estaciones telemétricas que la EAAB va a adquirir. Esto con el fin de que como tu sabes, nosotros vamos a instalar unas este año y no quisiera que instaláramos estaciones en el mismo sitio de las de ustedes. Si no tienes las coordenadas, me podrías regalar la localización más precisa que tengas?

Gracias!!

María Carolina Rogelis Prada

Profesional Especializado – Grupo Estudios
Coordinación de Investigación y Desarrollo
Área Técnica y de Gestión
Dirección de Prevención y Atención de Emergencias
Diag. 47 No. 77A – 09 Int. 11
Tel. (571) 429 2801 ext. 2902
Bogotá – Colombia
www.fopae.gov.co
www.sire.gov.co

ESTA COMUNICACIÓN PUEDE CONTENER MATERIAL CONFIDENCIAL Y/O INFORMACIÓN

CON DERECHOS reservados del propietario, por lo tanto el uso de las mismas es exclusiva para el destinatario. Si usted recibió este material por error, por favor notifíquelo inmediatamente al remitente y borre el email y cualquier documento o documentos asociado con el email. Muchas Gracias.

THIS COMMUNICATION MAY CONTAIN CONFIDENTIAL AND/OR OTHERWISE PROPRIETARY MATERIAL and is thus for use only by the intended recipient. If you received this in error, please contact the sender and delete the e-mail and its attachments from all computers.

ESTA COMUNICACIÓN PUEDE CONTENER MATERIAL CONFIDENCIAL Y/O INFORMACIÓN CON DERECHOS reservados del propietario, por lo tanto el uso de las mismas es exclusiva para el destinatario. Si usted recibió este material por error, por favor notifíquelo inmediatamente al remitente y borre el email y cualquier documento o documentos asociado con el email. Muchas Gracias.

THIS COMMUNICATION MAY CONTAIN CONFIDENTIAL AND/OR OTHERWISE PROPRIETARY MATERIAL and is thus for use only by the intended recipient. If you received this in error, please contact the sender and delete the e-mail and its attachments from all computers.

Carolina Rogelis

De: jacopete@acueducto.com.co
Enviado el: Miércoles, 07 de Julio de 2010 06:54 p.m.
Para: Carolina Rogelis
Asunto: Re: Localización nuevas estaciones EAAB
Datos adjuntos: ATT00404.gif

Cordial Saludo,

Hola Carolina: Lamento darte respuesta tan tarde ,pero estuve en campo unos días y ando con varias cosas pendientes.

espero que esto te sirva
me cuentas

Ciao!

Identificación		Tipo*
No.	Nombre	
1	Techo	CO
2	Mariscal Sucre (Soacha)	CO
3	Planta Yomasa	CO
4	Río Bogotá Navara	HMT
5	Río Bogotá PTAR	HMT
6	Río Tunjuelo Grancolombiano	HMT
7	Río Tunjuelo San Benito	HMT
8	Río Tunjuelo Puente La Isla	HMT
9	Río Fucha – Entre la avenida 68 y la avenida ciudad de Cali	HMT
10	Cambridge School	PG
11	Laboratorios La Hormona	PG
12	Contador	PG
13	Olarte	PG
14	Camavieja	PG
15	Modelia (centro de control)	PG
16	Cerro de Suba	PG
17	Usaquen Santa Ana	PG
18	El Granizo	PG
19	Salitre Km. 9	PG

Atentamente,

James Copete
Ing. Hidrología Básica
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)
Tel: +57 (1) 3447819
Cel: +57 3153185161

"Carolina Rogelis" <crogelis@fopae.gov.co>

28/06/2010 03:59 p.m.

Para <jacopete@acueducto.com.co>
cc
Asunto Localización nuevas estaciones EAAB

Hola James!

Quisiera molestarte con algo, sería posible que me regalaras la localización con coordenadas de las nuevas estaciones telemétricas que la EAAB va a adquirir. Esto con el fin de que como tu sabes, nosotros vamos a instalar unas este año y no quisiera que instaláramos estaciones en el mismo sitio de las de ustedes. Si no tienes las coordenadas, me podrías regalar la localización más precisa que tengas?

Gracias!!

María Carolina Rogelis Prada

Profesional Especializado – Grupo Estudios
Coordinación de Investigación y Desarrollo
Área Técnica y de Gestión
Dirección de Prevención y Atención de Emergencias
Diag. 47 No. 77A – 09 Int. 11
Tel. (571) 429 2801 ext. 2902
Bogotá – Colombia
www.fopae.gov.co
www.sire.gov.co

ESTA COMUNICACIÓN PUEDE CONTENER MATERIAL CONFIDENCIAL Y/O INFORMACIÓN CON DERECHOS reservados del propietario, por lo tanto el uso de las mismas es exclusiva para el destinatario. Si usted recibió este material por error, por favor notifíquelo inmediatamente al remitente y borre el email y cualquier documento o documentos asociado con el email. Muchas Gracias.

THIS COMMUNICATION MAY CONTAIN CONFIDENTIAL AND/OR OTHERWISE PROPRIETARY

MATERIAL and is thus for use only by the intended recipient. If you received this in error, please contact the sender and delete the e-mail and its attachments from all computers.