

Diseño óptimo de redes pluviométricas

Optimum design of rainfall network

MARÍA ISABEL ROJAS POLANCO¹
y LUIS EDUARDO MORA MORA²

Recibido: 25-04-08 / Aceptado: 10-09-09

¹ Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Mérida, Venezuela, E-mail: miropo@ula.ve

² Universidad de Los Andes, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Mérida, Venezuela, E-mail: luismora@ula.ve

Resumen

En este trabajo se presenta un diseño de Red Óptima Pluviométrica, aplicando el método de Punto Ficticio, derivado de la aplicación de krigeado, con el cual se logra minimizar la incertidumbre de la estimación global de la precipitación medida en el área de estudio y eliminar los máximos locales de incertidumbre, con la inserción de nuevas estaciones reforzando a la red mínima de observación. El método se aplicó en cuencas que conforman el Sistema Yacambú-Quíbor, de relieve irregular, partiendo de la selección de una red mínima pluviométrica logrando que a partir de las localidades adicionales de observación seleccionadas, se evaluara la naturaleza física y estocástica de la precipitación, disminuyendo la incertidumbre en un 50% aproximadamente y representando la variabilidad espacial del comportamiento de la precipitación en el área de estudio, para fines de planificación, desarrollo y evaluación de proyectos de manejo del recurso agua en el lugar de estudio.

Palabras clave: optimización de redes meteorológicas, kriging, punto ficticio, geoestadística, Sistema Yacambú-Quíbor.

Abstract

In this work, an optimal pluviometric net design is presented based on the fictitious point method, derived from the Kriging application which allows for minimizing the uncertainty in the global estimation of precipitation measured on the study area and eliminating the uncertainty local maxima by including new observation points. The method was applied for the Yacambú-Quíbor's watershed system (Venezuela), which has an irregular topography. Starting with the selection of a minimum pluviometric net and by adding additional observation points at selected localities, the physical and stochastic nature of the precipitation was evaluated, reducing the uncertainty in approximately 50% and representing the spatial variability of the precipitation in the study area, (which is useful) for planning, development and evaluation of water resource management projects.

Key words: optimal pluviometric net design, Kriging, fictitious point method, geostatística, Yacambú-Quíbor's watershed system.

1. Introducción

El diseño de una red pluviométrica consiste en la determinación del número y ubicación de estaciones de medición sobre una región con la finalidad de obtener un registro histórico de datos que puedan caracterizar el fenómeno de precipitación en el espacio y en el tiempo. Es por ello que en el diseño se debe incorporar fundamentalmente dos consideraciones: la primera, el conocimiento de la naturaleza física y estocástica de los procesos meteorológicos y la segunda, el uso que se le dará a los datos. Además, según la División de Recursos Hídricos del U.S. Geological Survey, citado por Rojas (1994), en la red de observación se debe lograr la integración de la eficiencia en la recolección de los datos y la efectividad de la información.

A partir de una red mínima de observación, en la cual se llega a tener una "estimación regional", es preciso obtener un Diseño Óptimo, cuyo objetivo principal será apoyar la planificación, desarrollo y evaluación de proyectos que permitan un mejor manejo del recurso agua en el lugar de estudio.

Uno de los métodos de mayor uso en la optimización de redes es el método de krigeado, el cual ha sido aplicado en redes hidrometeorológicas (Rojas, 1994); en calidad de aguas subterráneas (Mora, 1996) y por otros investigadores entre los que resaltan los trabajos realizados por Igúzquiza (1998), y recientemente Becerra y Gutiérrez (2006), además de Carrera y Gaskin (2008).

A través del kriging cada valor estimado tiene asociado una estimación de su varianza que no depende de las observaciones, lo cual permite re-

forzar la red o determinar la localización óptima de un eventual punto adicional sin necesidad de conocer de antemano el valor de la variable.

El kriging es un método que permite obtener un mejor estimador lineal no sesgado (BLUE), con el cual se encuentra la mejor estimación o predicción lineal posible de una variable a partir de la información disponible y relaciones de dependencia espacial, imponiendo para ello ausencia de sesgo y la minimización de la varianza de la estimación. Según Mora (1996), lo atractivo del kriging es que permite determinar la varianza de la estimación y con ello detectar un error sistemático que no depende directamente de los datos, lo que es importante cuando se diseña una red, dado que se puede pensar en localizar nuevos puntos de observación ubicándolos de manera tal que se minimice la varianza de la estimación tanto de forma global como local.

Por otro lado Papamichail y Metaxa (1996), confirmaron que la varianza del kriging depende de la estructura y geometría de la red de observación y cualquier punto estimado puede ser incluido en el diseño óptimo. Morrissey *et al.* (1995), estimaron el error estándar espacio temporal como una medida de evaluación de las redes pluviométricas. Bell y Kundu (2003), hicieron uso de un modelo espectral así como también funciones empíricas ortogonales para definir la estructura espacial de la precipitación. Herrera y Pinder (2005), utilizaron filtros de Kalman en la optimización de un diseño de red de calidad de aguas subterráneas con el objetivo de minimizar los costos por muestreo de contaminantes.

Más recientemente, para lograr la optimización en el diseño de redes Hidroclimáticas, Diggle y Lophaven (2006) aplicaron un modelo geoestadístico bayesiano y, Teegavarapu (2007), utilizó los principios de redes neuronales como funciones de aproximación a la estructura de varianza de datos.

El presente trabajo propone el diseño de una Red Óptima Pluviométrica, considerando como zona piloto el área correspondiente al Sistema Yacambú-Quíbor, donde se aplicó el método de Punto Ficticio (Delhomme, 1978; Samper y Carrera, 1990) como un método derivado de la aplicación del kriging debido a su capacidad de representar espacialmente el impacto de la ubicación de nuevas estaciones en la disminución de la varianza espacial de la precipitación media en un dominio dado, logrando con ello la optimización en ubicación de

las estaciones que conformarían una red mínima de observación.

2. Materiales y métodos

2.1 Características generales del sistema Yacambú-Quíbor

El sistema Yacambú-Quíbor, está ubicado en el estado Lara, municipio Andrés Bello y se localiza entre las coordenadas 69°39' y 69°43' de longitud Oeste y entre los 09°33' y los 09°38' de latitud Norte. Físicamente está situada en la vertiente Sur de la Sierra de Portuguesa, tiene una extensión de 396 km² y limita al Norte con la cuenca del río Turbio, al Noroeste con la cuenca del río Tocuyo, al Sur con el río Morador y al Sudeste con el río Guache. La cuenca forma parte del sistema montañoso de la Cordillera de los Andes, su relieve se caracteriza por ser predominantemente montañoso con alturas hasta de 2.160 metros sobre el nivel del mar en contraste con áreas de pendiente suaves y valles estrechos, existiendo un gradiente altitudinal significativo entre la zona llana y la montañosa. Las principales filas montañosas presentan crestas agudas y fuertemente inclinadas, cubiertas de una densa vegetación. El drenaje de la zona lo forma un sistema irregular compuesto por el río Yacambú como colector principal y al cual vierten sus aguas otros ríos y quebradas, por la margen izquierda: El Barranco, San Carlos, El Puente, La Negra, La Escalera y Quebrada Honda, y por la margen derecha: Los Palmares, Pedro Jiménez, Agua Blanca, Los Villegas y Cerro Blanco. Todas estas quebradas tienen pendientes muy pronunciadas, descendiendo su longitud relativamente corta desde su nacimiento, 2160 m.s.n.m. hasta el cauce, cuya elevación promedio es 800 m.s.n.m. y con un desarrollo general de un patrón de drenaje predominantemente del tipo dendrítico.

2.2 Red de estaciones pluviométricas

Los datos de precipitación para esta cuenca se obtuvieron de la División de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Poder Popular del Ambiente. En el cuadro 1 se incluye la red inicial de las estaciones utilizadas y la localización de las mismas se muestra en la figura 1.

Cuadro 1. Listado de estaciones pluviométricas. Fuente: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA, 2009).

Serial	Estación	Altura	Latitud	Longitud	Serial	Estación	Altura	Latitud	Longitud
1174	Quebrada Arriba	615	101439	703153	2151	Sabana Grande	200	94225	703158
1177	Altagracia	479	102056	701214	2152	Cenizo-Secundario D3	62	93300	704530
1186	Burere	430	100622	701439	2201	Curarigua	627	95957	695507
1187	Carora-Granja	413	100946	700455	2204	Quibor	682	95511	693739
1202	Barquisimeto-Fundacion	528	100453	691740	2208	Maporal	415	95435	691132
1203	Cambural	550	102541	693731	2215	San Miguel	1097	95240	693103
1204	Canape	658	100111	693147	2216	San Miguel	1005	95129	693043
1208	Barquisimeto-Seminario	592	100512	691812	2219	Miracuy	1161	93744	693350
1210	Barquisimeto-Alcaldia	598	100523	692008	2221	Cruz Machadera	1845	95134	692623
1220	Agua Negra	1560	94843	693036	2225	Cubiro	1502	94728	693502
1221	Las Tablas	1330	94949	692953	2226	Capilla Bucaral	1050	94844	692229
1222	El Zancudo	1355	94700	693220	2227	Paso Angostura	190	91123	693058
1265	Bobare	660	101725	692748	2228	Auro	280	94239	691421
1268	Duaca	750	101658	690849	2231	Caspito	1300	93934	693943
1271	Arenales	428	100924	695423	2232	Parque Yacambu	1484	94230	693436
1272	Banco de Baragua	787	100849	693531	2233	La Cruz	1200	94500	692947
1273	Turturia-San Pablo	720	100833	694221	2234	Sanare	1330	94433	693924
1274	Guadalupe	582	100229	694043	2235	Sanare	1350	94400	693900
1277	Hacienda Cuji-Caracas	486	100513	702258	2236	La Escalera	1340	94300	693100
1278	El Cuji	620	101000	691900	2237	Riecito	1280	95148	692147
1282	Barquisimeto/B.A.	613	100400	691900	2239	Agua Blanca	175	94001	690553
1285	Barquidimeto-Salle	375	100400	690700	2241	Humocaro Bajo	941	94128	695719
1321	Cayure	320	102543	685934	2246	Hacienda Camburito	285	93603	691910
1322	Aroa Dispensario	278	102608	685333	2248	Araure	200	93600	691300
1342	Guama	340	101707	684901	2251	Humocaro Alto-Vivero	950	93732	695917
1354	Guarabao	260	101454	684811	2252	La Mesa	1195	93353	695953
1362	Campo Elias	460	101317	685434	2253	Hacienda Guache	255	92537	692153
1371	Urachiche	435	100848	690039	2255	Acarigua	198	93408	691313
1381	Central Matilde	235	100839	685211	2259	Payara	152	92943	690443
2106	El Jabon	1499	94845	700711	2264	Acarigua-Aeropuerto	226	93300	691400
2118	El Empedrado	844	95205	701624	2287	Las Cumbres	1589	95212	691925
2119	Trentino-La Pastora	559	94844	701041	2290	Las Trojas	1409	95156	691656
2126	Valle Hondo	800	94007	701657	2331	San Rafael de Onoto	175	94052	685815
2127	Puente Villegas	621	94548	701435	2333	La Ceiba-Camoruco	150	93903	684423
2128	Agua de Obispos	2114	94133	700553	2334	Las Majaguas	182	93913	685937
2129	San Antonio	237	94338	702651	2340	Cojeditos	160	93847	685510
2132	Agua Viva	110	93335	703731	2342	Santa Teresa	150	93123	685137
2133	Monay	292	93300	702732	2351	Tocuyano	140	93132	685737
2138	La Concepcion	1125	93330	701508	2357	Guabinas	188	94127	685255
2139	Sabana Grande-Guago	1388	93514	695136	2362	Guayabito	140	93021	684831
2141	Cenizo-Campamento Vivian	124	93207	704026	6332	El Trigal	1680	102140	684938
2146	Guamas De Monay	272	93807	702500					
2148	Cende	3000	93149	701005					

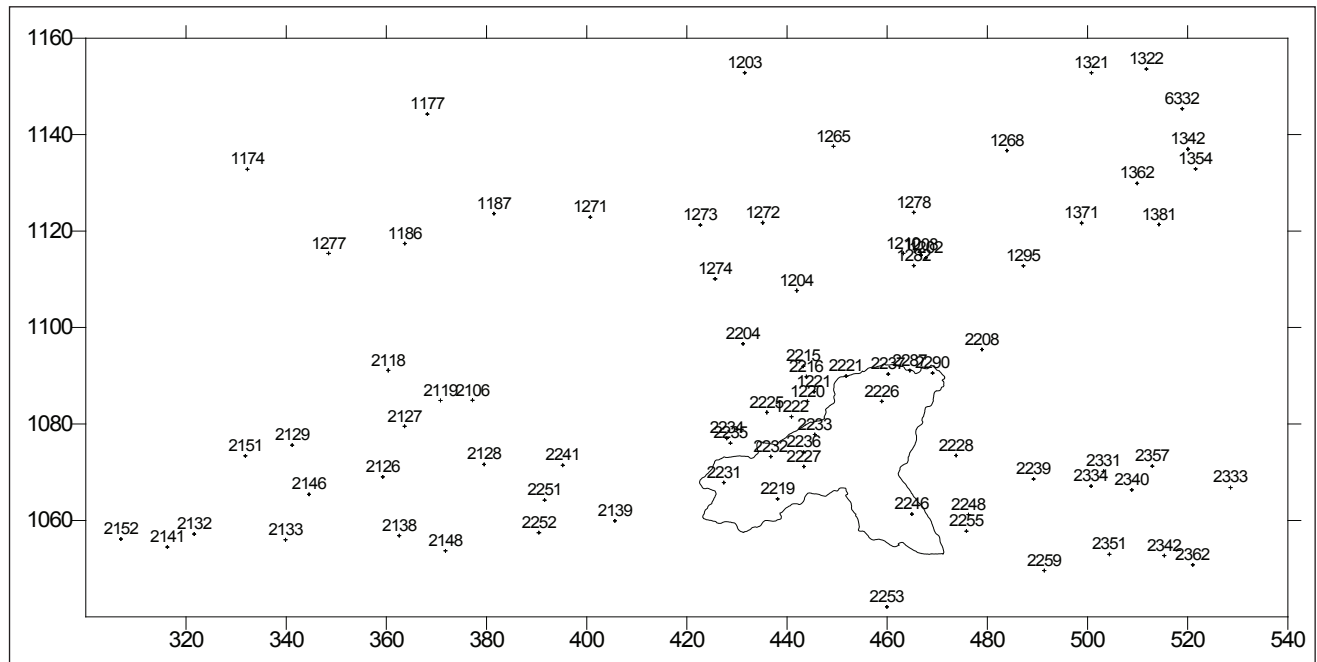


Figura 1. Ejemplo de red básica de observación pluviométrica. Caso sistema hidráulico Yacambú-Quíbor. Venezuela.

2.3 Controles climáticos

La ubicación del área de estudio en el sistema montañoso de la cordillera Andina, hace que el clima regional sufra las influencias de la altitud, de la circulación de los Alisios y de las masas de aire del Sur. La cordillera de los Andes actúa como una barrera climática sobre la circulación atmosférica del occidente del país, produciendo importantes consecuencias en el clima. Durante el verano astronómico, estación lluviosa en Venezuela de abril/mayo a septiembre/octubre, la alta precipitación en la cuenca se explica por la incidencia de los vientos dominantes de la región, los Alisios del noreste, los cuales cargados de humedad, chocan en un ángulo favorable contra el sistema montañoso. Allí los vientos se ven obligados a ascender y como consecuencia a enfriarse, con lo cual se producen lluvias orográficas, las cuales se acentúan por el calentamiento excesivo de la llanura de Barlovento, originando un tipo de lluvia orográfico convectivo. También durante el verano astronómico el área se encuentra bajo la influencia de las masas de aire del Sur relacionadas con la Zona de Convergencia Intertropical y durante el invierno astronómico, período de sequía en Venezuela (noviembre/diciembre a abril), bajo la influencia de incursiones de frentes fríos modificados que invaden a Venezuela

produciendo lluvias de extraordinaria magnitud fuera de la época.

En la mayor parte de la cuenca, la estación lluviosa se observa entre los meses de abril a noviembre, presentando el máximo de precipitación en el mes de junio, y la estación seca de diciembre a marzo, registrándose el mínimo en el mes de enero. Su régimen pluviométrico es del tipo bimodal observándose un máximo principal en el mes de junio y un máximo secundario en el mes de octubre. La temperatura media anual en la cuenca es de 21,3 °C y en lo referente a la evaporación, los máximos corresponden al mes de marzo y los mínimos a junio, siendo el valor promedio anual de 1.371,8 mm.

El sistema hidráulico Yacambú-Quíbor, constituye una de las obras de infraestructura más importantes del estado Lara, ya que permitirá abastecer de agua la zona agrícola del Valle de Quíbor y el área metropolitana e industrial de Barquisimeto. En el Valle de Quíbor se produce pimentón, tomate, frutales, uva, caña de azúcar y muy especialmente cebolla. En este rubro casi el 60% de la producción nacional proviene del estado Lara, y el 90% de la cebolla sembrada en el estado se cosecha en Quíbor, lo que dice bastante de la relevancia económica que representa para el país esta región. Se estima que el sistema Yacambú producirá 330 millones de metros cúbicos de agua por año, pero su

buen funcionamiento y operación dependerá de la disponibilidad de agua.

2.4 Características más importantes del método del krigeado

Según Samper y Carrera (1990), la varianza de estimación no depende del valor medido de la variable. Por tanto, es posible determinar la estructura de dicha varianza antes de realizar las medidas. Si se tiene en cuenta que la varianza es posiblemente la mejor medida de la incertidumbre, se llega a la conclusión de que el krigeado es un método que se adapta muy bien al diseño de redes de observación.

La aplicación de Kriging al diseño de redes tiene una metodología distinta según sea el objetivo que se persiga (Rodríguez y Mejías, 1974). Para el diseño óptimo, se tienen dos objetivos: minimizar la incertidumbre de la estimación global de la precipitación medida en el área de estudio y eliminar los máximos locales de incertidumbre; es decir, disminuir la varianza en las estimaciones locales con la inserción de nuevos puntos de observación. En ambos casos se aplicará el Método del Punto Ficticio, según el procedimiento expuesto por Samper y Carrera (1990) que cita experiencias exitosas realizadas por Delfiner y Delhomme (1973) en el Sahel.

2.4.1 Estimación global

La formulación principal del método es calcular la ganancia en reducción de la estimación de la varianza global a partir de la inclusión de un nuevo punto (estación) de observación, la cual será medida por el índice de reducción relativa de la incertidumbre, definido por Delhomme (1978) como:

$$G(x) = \frac{\sigma_0^2 - \sigma_{(x)}^2}{\sigma^2}$$

Donde: σ_0^2 es la varianza de la estimación con los n puntos ya existentes de la red y $\sigma_{(x)}^2$ es la varianza de la estimación cuando se añade un nuevo punto en la posición x .

Se asumirá que no existen limitaciones en cuanto a la ubicación del punto y se recorre todo el dominio con posiciones ficticias de la estación o punto adicional calculándose la varianza global de la estimación con este nuevo punto a fin de ob-

servar las zonas donde es posible ubicar una nueva estación. Mediante esta técnica se procede a obtener las zonas donde se reduce la varianza de estimación global de precipitación y, en consecuencia, una ganancia en la precisión de la estimación. Esta ganancia se representa en forma espacial mediante un mapa de isolíneas de ganancia en la estimación global. Para estimar la varianza global se usa un krigeado por bloques en el dominio del área estudio, con una malla de 80 x 104 km, integrando al variograma en su dominio con una matriz de 10 x 10 puntos discretos, según el criterio propuesto por Deutsch y Journel (1998) en el programa OKB2D realizado por estos autores.

2.4.2 Estimación local

El objetivo de la estimación local es reducir zonas de máxima incertidumbre; el incluir un nuevo punto implica que se tendrán nuevas varianzas puntuales y solo se hará evidente el mejoramiento de la zona de interés, pero no de todo el dominio del área de estudio (Mora, 1996). El hecho de colocar un punto de medida adicional según Samper y Carrera (1990), tendrá una incidencia sobre las varianzas del krigeado de todos los puntos que harán intervenir ese punto para el cálculo de sus factores de ponderación. Delhomme (1978) sugiere que en este caso sólo se puede esperar eliminar los máximos de la incertidumbre, para lo cual se supone la existencia de un punto adicional en los sitios de mayor varianza y se compara la varianza obtenida con la varianza de la red de observación existente, logrando solo establecer índices de ganancia puntual referida a la obtenida en un mismo punto con el conjunto inicial de datos. Este procedimiento se realiza observando el mapa de varianza del error de estimación generado en el modelo de variabilidad espacial.

Tanto en la estimación global como en la local, según el método del Punto Ficticio (Samper y Carrera, 1990), es necesario construir el sistema de ecuaciones de krigeado como si se contara la medida en el punto adicional "ficticio" y luego se calcula la varianza de krigeado. Para el krigeado es necesario, en principio, realizar un análisis estructural de los datos y luego realizar un proceso de búsqueda de una función lineal de los datos donde la estimación de las incógnitas sea no sesgada y tenga la mínima varianza.

En el análisis estructural de los datos, se utilizó la información pluviométrica registrada en la red mínima, verificando la normalidad en los datos, y posteriormente se seleccionó el modelo de variabilidad espacial definido como modelo de variograma (Mora, 1996; Becerra y Gutiérrez, 2006). Esta etapa de variografía para la cual se utilizó el programa Variowin 2.2 de Pannatier (1996), comprendió la estimación de parámetros que definen el variograma, la posible presencia de anisotropía y validación del modelo en función de la calidad estadística del mismo. Una vez obtenida la bondad de ajuste del modelo mediante la validación cruzada, se calculó la varianza del kriging, bien de manera global o como incertidumbre local. Por último, se utiliza como una variable la presencia de vías de comunicación a fin de estudiar la posibilidad de instalar y mantener operativa una estación en las localidades que fuesen necesarias colocar como puntos adicionales.

3. Resultados y discusión

3.1 Estimación global

Una vez que los valores de precipitación fueron transformados de manera logarítmica para ser ajustados a una distribución normal, en la etapa de variografía, donde se observó una anisotropía del tipo esférico (Figura 2), con la dirección de máxima continuidad en 30° , marcada por el sistema montañoso.

Se ajustó el modelo teórico de variabilidad espacial, siendo el más adecuado el del tipo esférico (Figura 3) con una meseta de 0,23 y un alcance de 46.500, con un efecto de pepita igual a 0,03462, con lo cual logramos una estructura próxima a los valores de varianza.

Para validar el modelo teórico ajustado al variograma y confirmar que éste es el adecuado, se utilizó el método de validación cruzada implemen-

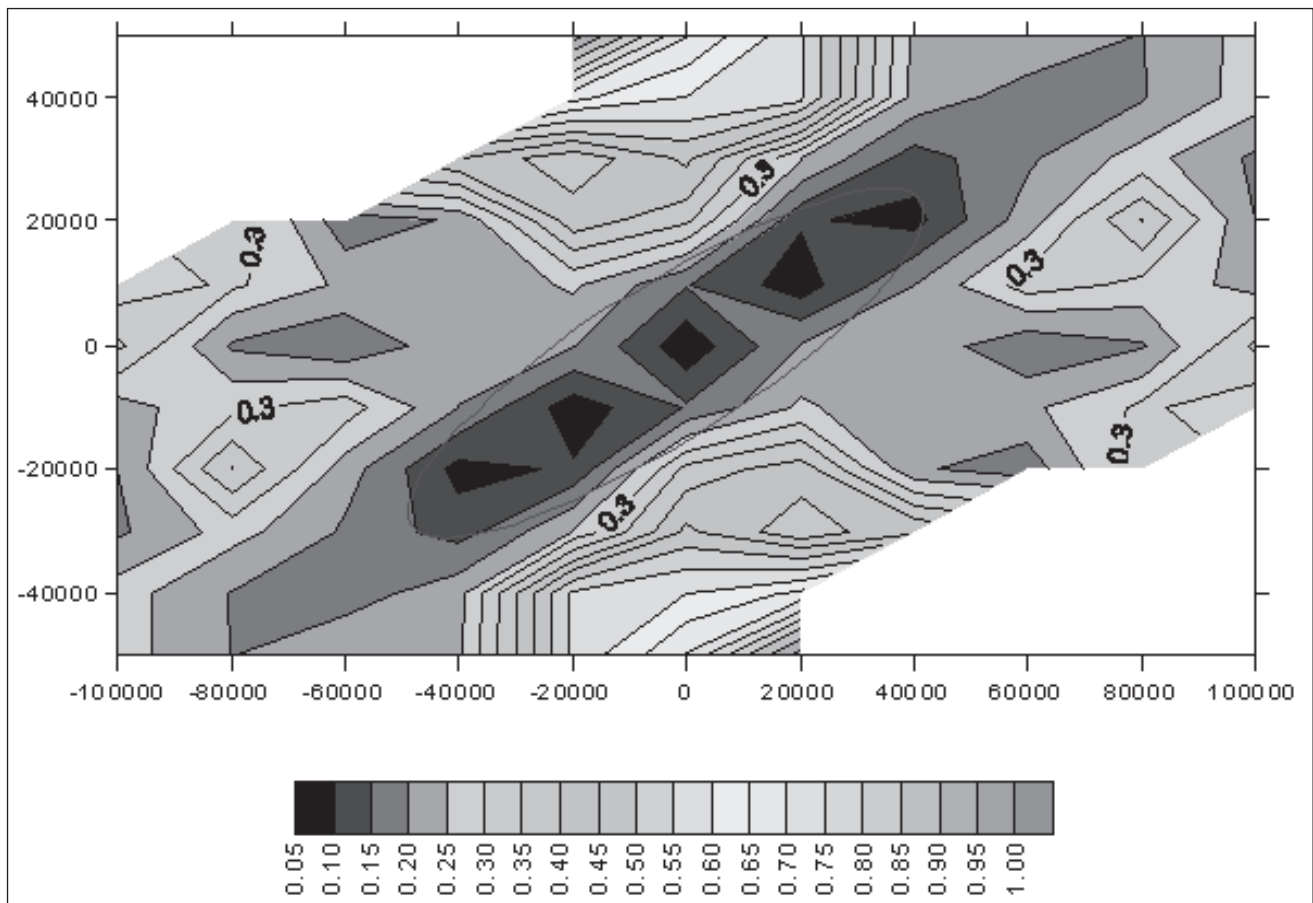


Figura 2. Variograma de superficie para el sector Yacambú-Quibor.

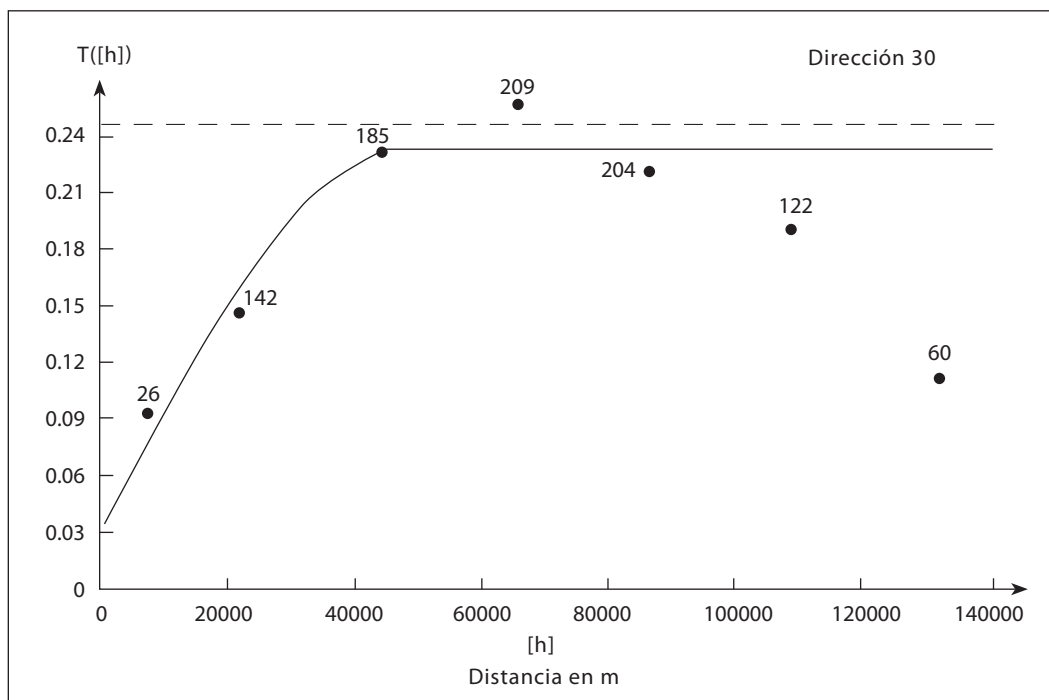


Figura 3. Modelo esférico adaptado al variograma.

Cuadro 2. Verificación de los resultados obtenidos a partir de la validación cruzada.

Parámetro analizado	Valor de precipitación	Criterio de aceptación
Media de los errores (Z'-Z)	-0.006	Cercana a cero
Error cuadrático medio	0.225	Que sea mínimo
Error cuadrático medio adimensional	0.885	Cercano a uno
Varianza del Kriging	0.082	Que sea mínima

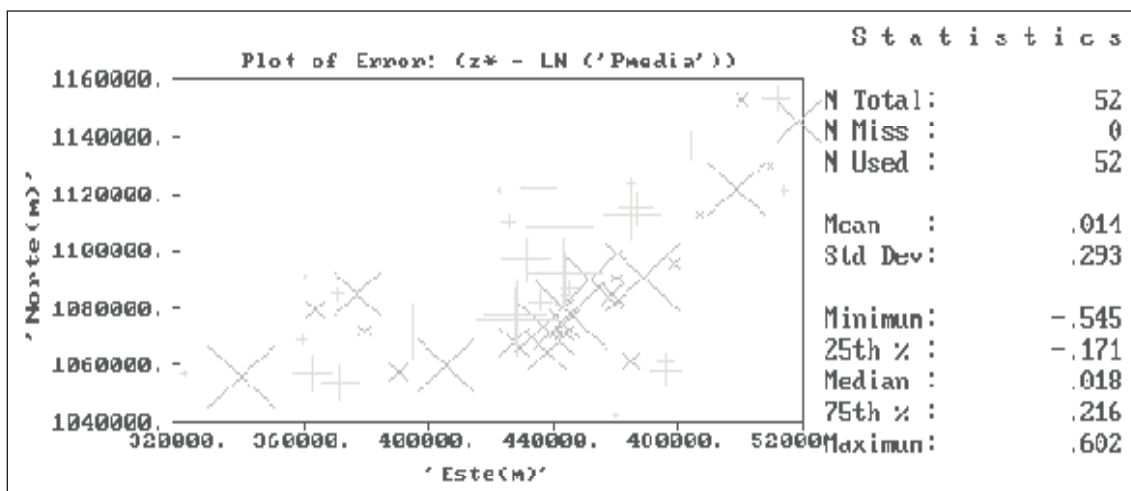


Figura 4. Errores relativos del kriging. La magnitud relativa de los errores de validación del modelo adaptado para los variogramas de la variable en estudio son: (+) error por defecto y (x) por exceso.

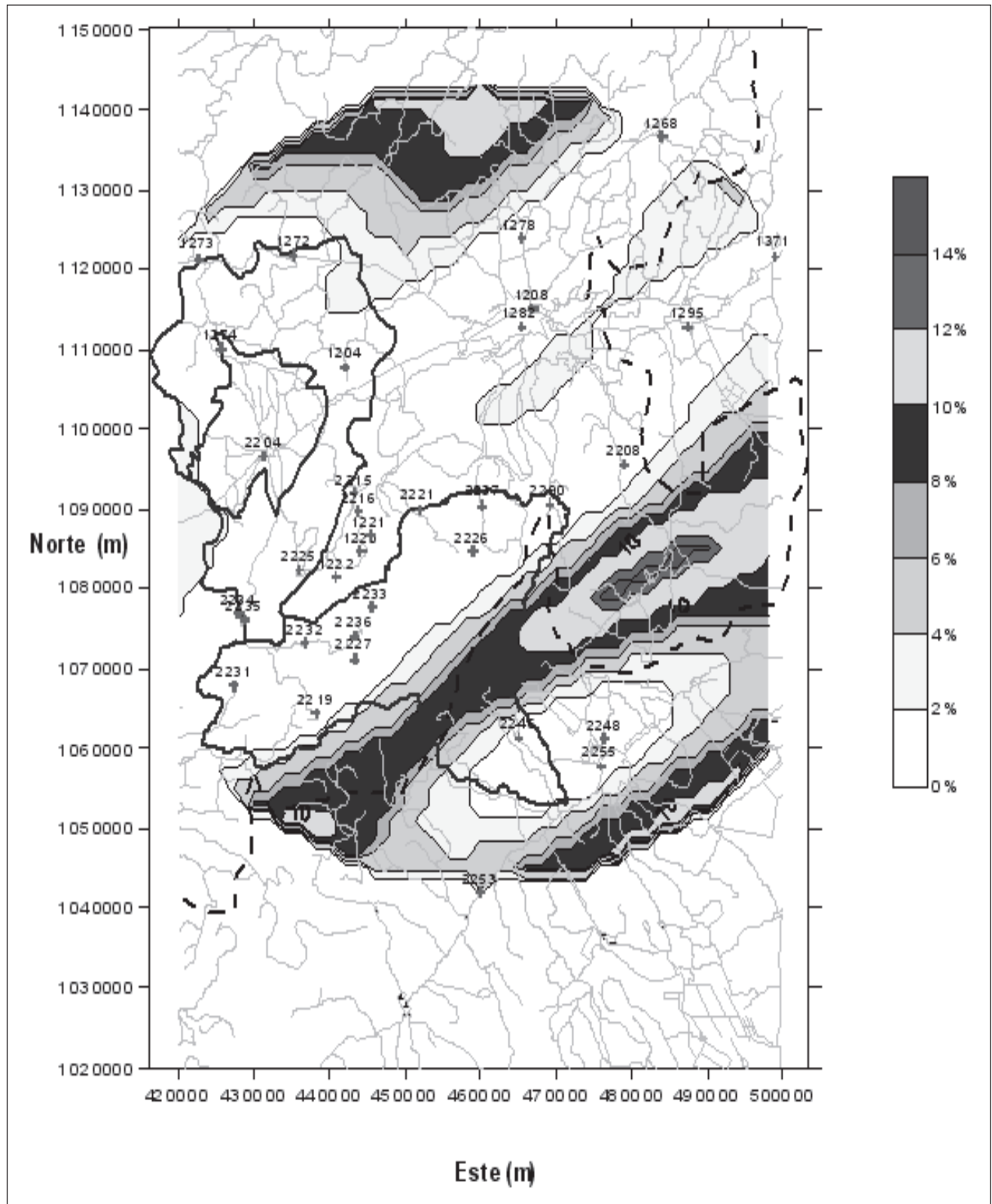


Figura 5. Mapa de isoganancia global en la estimación de la precipitación con la ubicación de una estación pluviométrica adicional en el sector Yacambú-Quibor.

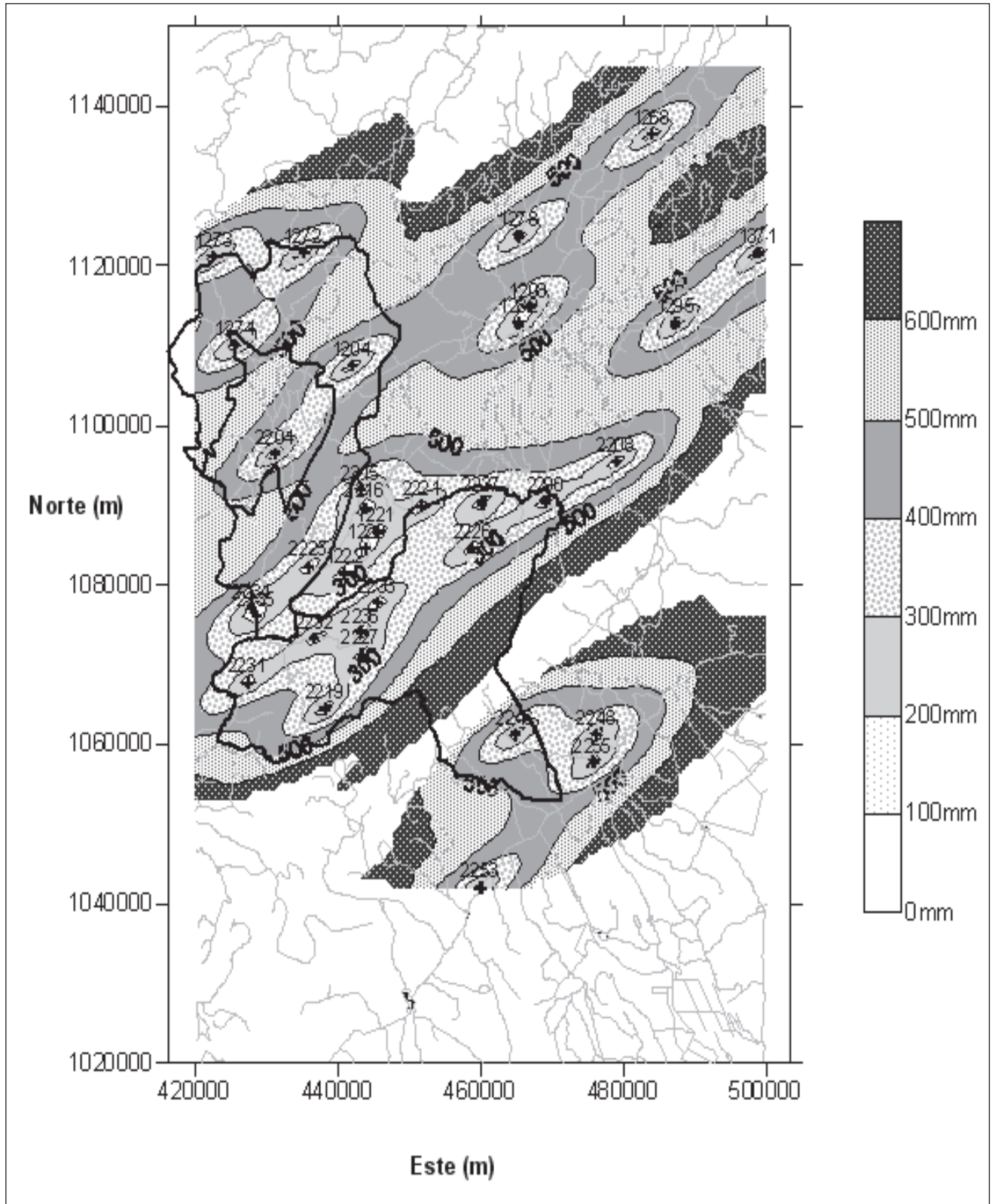


Figura 6. Mapa de isovarianzas del krigeado de precipitación para el sector Yacambú-Quibor.

tado en el programa GeoEAS (1991), cuyos resultados se presentan en el cuadro 2.

En la figura 4 se expresan los errores relativos del krigiado para la precipitación, donde se observa que son mayores en la zona Sur de la cuenca del río Yacambú y en las áreas Este y Oeste muy alejadas de la misma.

El mapa de ganancia global de la estimación se presenta en la figura 5, donde de muestra que

la mayor ganancia en la varianza de la estimación, 12%, se produce en la zona Este de la cuenca, que es precisamente donde no se posee estaciones y muy particularmente en la zona Sureste, entre 8 y a 10 % de isogancia, en la cual el modelo de estimación espacial según el método Spline Laplaciano, aplicado por Rojas (1994), ajustó por altura, los valores máximos de precipitación.

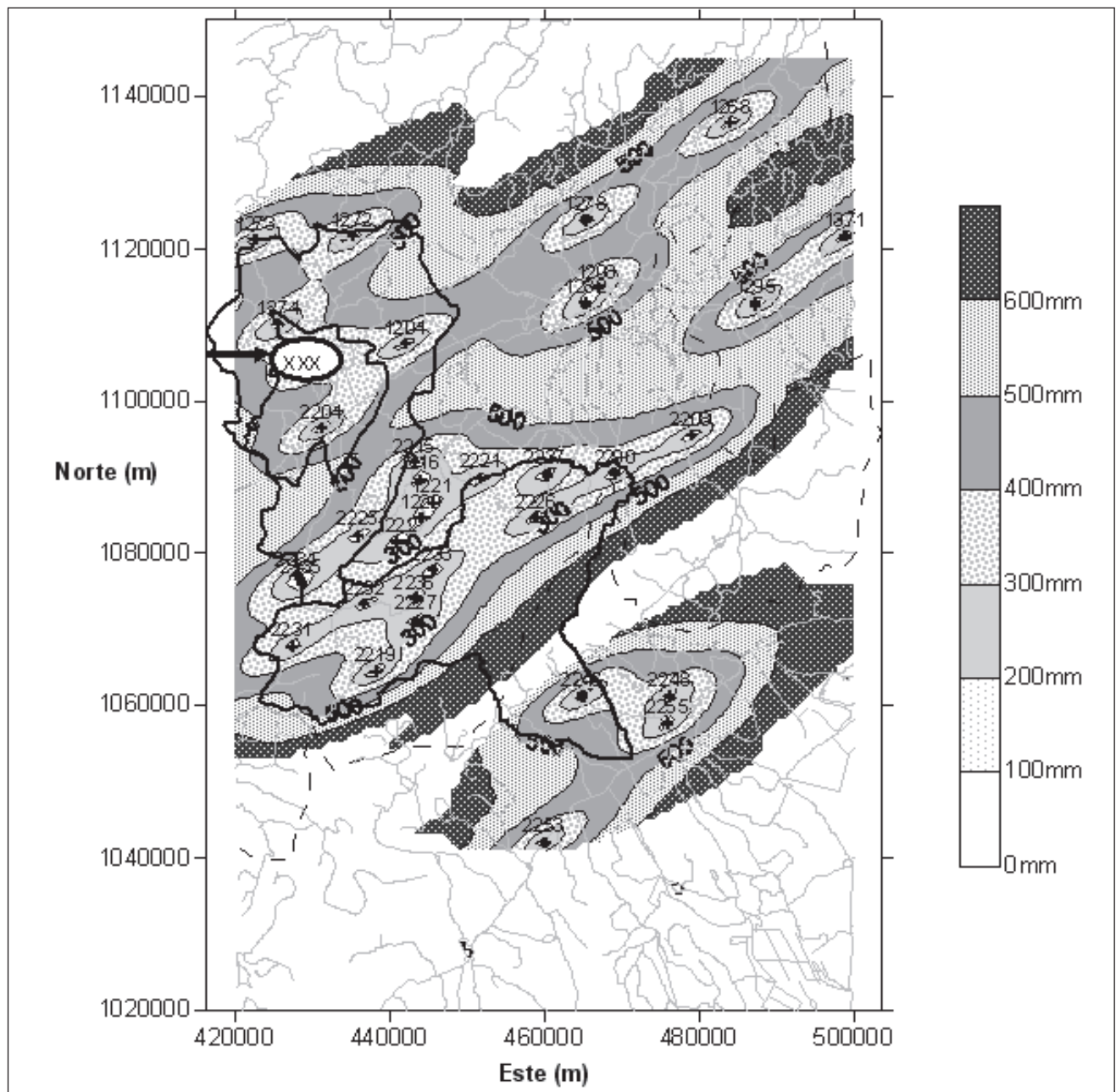


Figura 7. Ubicación de la estación XXX en Latitud: 10°00'00" Norte, Longitud 69°38'25" Oeste según el método de optimización del punto ficticio adicional.

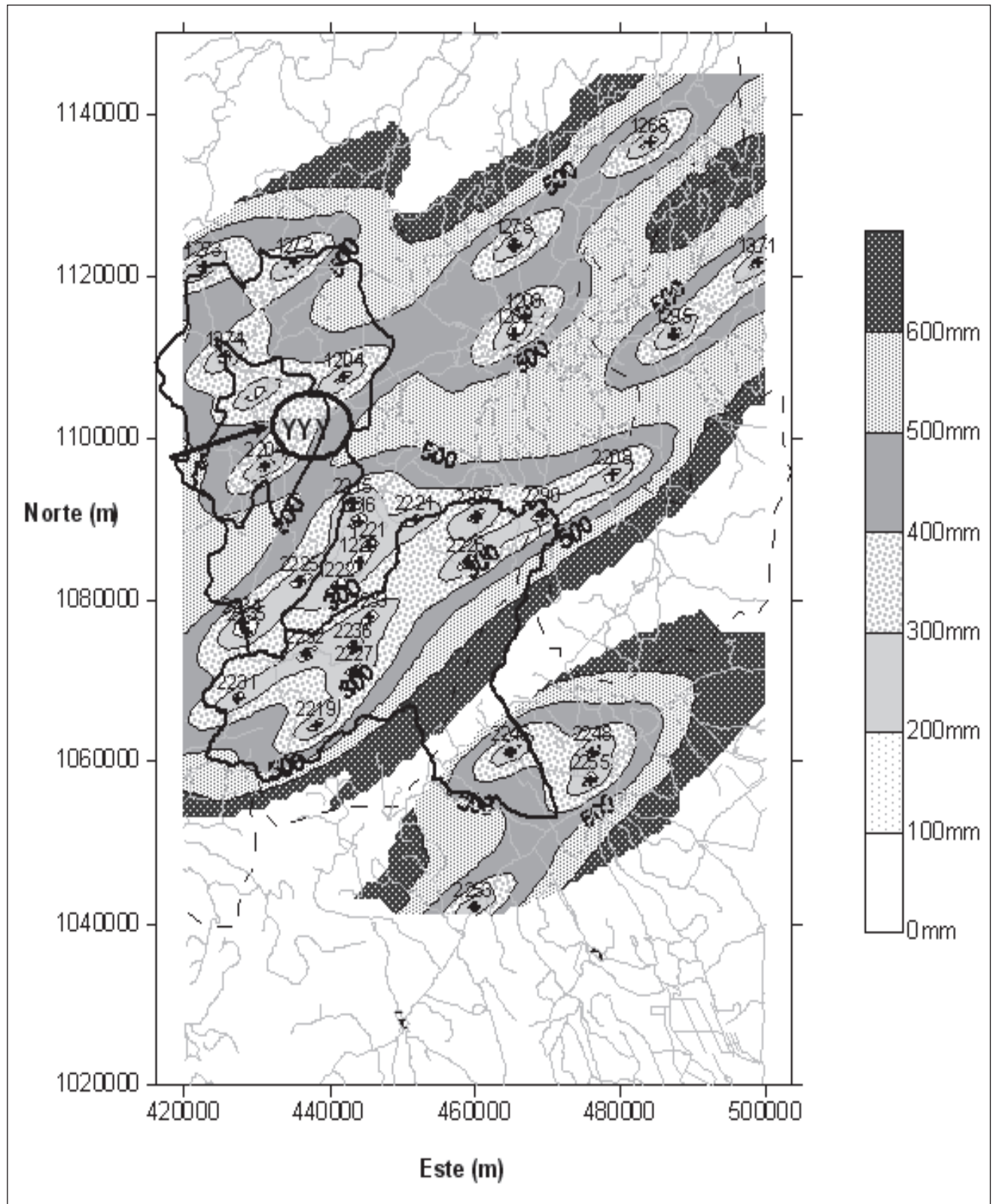


Figura 8. Ubicación de la estación YYY a ubicar en el Sector Latitud: 09°55'32" Norte Longitud: 69°32 '13" Oeste según el método de optimización del punto ficticio adicional.

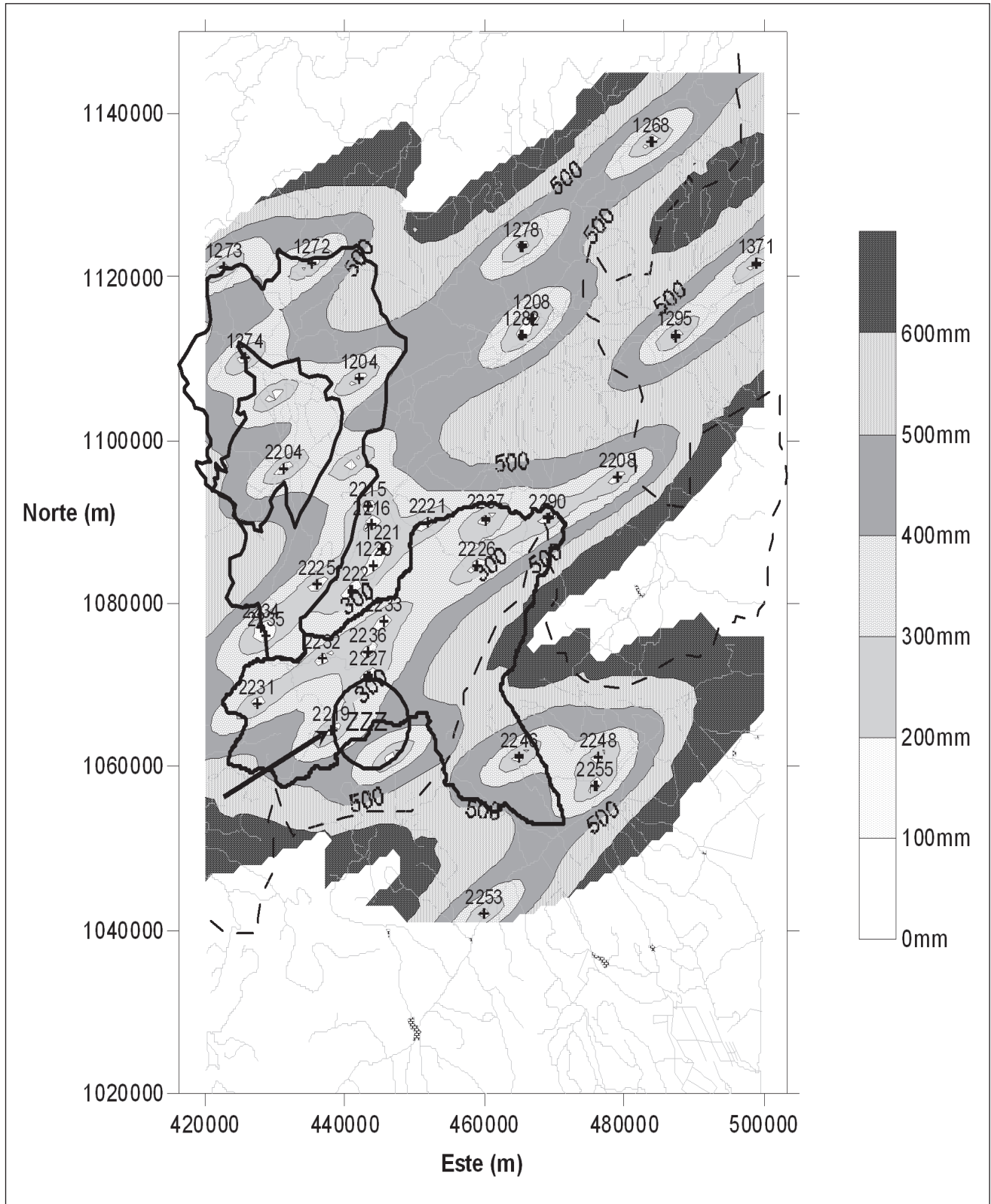


Figura 9. Ubicación de la estación: ZZZ a ubicar en el Sector Sureste: en Latitud 09°36'13" Norte y Longitud 69°29'03" Oeste según el método de optimización del punto ficticio adicional.

3.2 Estimación local: reducción de zona de máxima incertidumbre para el área analizada

Al observar la zona de máxima incertidumbre en el mapa de isovarianza del krigeado de precipitación (Figura 6) se nota que existen áreas bien definidas de máxima varianza. A fin de reducir estas zonas de alta incertidumbre, se colocó un punto ficticio de medición en cada sector, considerando además la existencia de una vía de acceso al lugar, observando que al agregar las estación XXX sector Norte (Figura 7), el punto de observación YYY en Sector

Este: 09°55'32'' Norte; 69°32'13'' Oeste (Figura 8) y en el sector Sureste: 09°36'13'' Norte; 69°29'03'' Oeste. Al colocar la Estación ZZZ (Figura 9) se gana una reducción en la incertidumbre local y una ganancia del 14% en la precisión de la estimación global de la precipitación en el área de estudio mostrada en la figura 5.

A partir de estos resultados anteriores, se determinó que la red óptima de estaciones para el sector Yacambú-Quibor estaría conformada por la lista dispuesta en el cuadro 3.

Cuadro 3. Estaciones climatológicas que deben conformar la Red Óptima para el sector Yacambú-Quibor.

Serial	Estación	Latitud	Longitud
1204	Canape	100111	693147
1272	Banco de Baragua	100849	693531
1273	Turturia-San Pablo	100833	694221
1208	Barquisimeto-Seminario	100512	691812
1220	Agua Negra	94843	693036
1221	Las Tablas	94949	692953
1222	El Zancudo	94700	693220
1268	Duaca	101658	690849
1282	Barquisimeto/B.A.	100400	691900
1285	Barquidimeto-Salle	100400	690700
2204	Quibor	95511	693739
2208	Maporal	95435	691132
2215	San Miguel	95240	693103
2216	San Miguel	95129	693043
2219	Miracuy	93744	693350
2221	Cruz Machadera	95134	692623
2225	Cubiro	94728	693502
2226	Capilla Bucaral	94844	692229
2227	Paso Angostura	91123	693058
2231	Caspito	93934	693943
2232	Parque Yacambu	94230	693436
2233	La Cruz	94500	692947
2234	Sanare	94433	693924
2235	Sanare	94400	693900
2236	La Escalera	94300	693100
2237	Riecito	95148	692147
2246	Hacienda Camburito	93603	691910
2248	Araure	93600	691300
2253	Hacienda Guache	92537	692153
1371	Urachiche	100848	690039
2259	Payara	92943	690443
2255	Acarigua	93408	691313
2290	Las Trojas	95156	691656
XXXX	Estacion Sugerida	100000	693825
YYYY	Estacion Sugerida	95532	693213
ZZZZ	Estacion Sugerida	93613	692903

4. Conclusiones y recomendaciones

A través de la aplicación el método del Punto Ficticio, se logró optimizar la red mínima de observación con lo cual se alcanzó mejorar la variabilidad espacial del comportamiento de la precipitación, permitiendo la mejor planificación, desarrollo y evaluación de proyectos que facilitan un mejor manejo del recurso agua en el lugar de estudio.

En relación a las localidades adicionales de observación seleccionadas, se consideró que revisten especial importancia tanto en la ganancia global de estimación de la precipitación en el área de estudio como en la medición de la precipitación, lo cual será importante en el manejo de uso de agua en el sector de Quíbor y en la estimación de la precipitación media en la zona.

5. Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes (ULA), por el financiamiento a este proyecto bajo el Código R-24-04-01-C. 30/09/08.

6. Referencias bibliográficas

BECERRA, R. y A. GUTIÉRREZ. 2006. Isoyetas de Relieve, una aproximación geoestadística a la distribución espacial real de la precipitación. Memorias del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mérida, Venezuela.

BELL, T. y P. KUNDU. 2003. Comparing satellite rainfall estimates with rain gauge data: Optimal strategies suggested by a spectral model. *J. Geophys. Res.* 108, 4121, doi:10.1029/2002JD002641.

CARRERA-HERRERA, J. y S. GASKIN. 2008. Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology* 336: 231-249.

DELFINER, P. y J. DELHOMME. 1973. *Optimum interpolation by kriging: Proceedings of NATO-ASI, Display and Analysis of Spatial Data*. Nottingham, John Wiley & Sons, New York/London. 450 p.

DELHOMME, J. 1978. Kriging in the hydrosiences. *Advances in water resources* 1: 251-266.

DEUTSCH, C. y A. JOURNEL. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York. 2nd edition. 376 p.

DIGGLE, P. y S. LOPHAVEN. 2006. Bayesian Geostatistical Design. *Scandinavian Journal of Statistics* 33: 53-64.

HERRERA, G. y G. PINDER. 2005. Space-time optimization of groundwater quality sampling networks. *Water Resources Research*, vol. 41, W12407, doi:10.1029/2004wr003626.

IGÚZQUIZA, P. 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.

GEO-EAS. 1991. *Geostatistical Environmental Assessment Software*. Version 1.2.1.

MORA, E. 1996. Aplicación de métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros de calidad de agua en acuíferos. Trabajo de Grado. Maestría en Recursos Hidráulicos. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 268 p.

MORRISSEY, M., J. MALIEKAL, J. GREENE y J. WANG. 1995. The uncertainty of simple spatial averages using rain gauge networks. *Wat. Resour. Res.* 31: 2011-2017.

MPPA. 2009. *Estaciones Pluviométricas en Venezuela*. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. Caracas, Venezuela. 213 p.

PAPAMICHAIL, D. y I. METAXA, I. 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. *Water Resources Management* 10(2): 82-96.

PANNATIER, J. 1996. *Variowin. Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer, Statistics and Computing. 387 p.

RODRÍGUEZ, I. y J. MEJÍAS. 1974. The design of rainfall networks in time and space. *Water Resource. Res.* 10(4): 713-735.

ROJAS, M. 1994. Análisis espacial de la precipitación en la cuenca del río Yacambú. IEAC. Trabajo especial de grado. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 234 p.

SAMPER, F. y J. CARRERA. 1990. *Geoestadística*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 451 p.

SPRUIELL, T. y L. CANDELA. 2006. Two Approaches to Design of Monitoring Networks. March 2006. *Scandinavian Journal of Statistics* 33: 53-60.

TEEGAVARAPU, R. 2007. Use of universal function approximation in variance-dependent surface interpolation method: An application in hydrology. *Journal of Hydrology* 332: 16-29.