

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN E INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LAS LLUVIAS EN BOGOTÁ, COLOMBIA

ANALYSIS OF DISTRIBUTION AND SPATIAL INTERPOLATION OF RAINFALL IN BOGOTA, COLOMBIA

ANDRÉS VARGAS

Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. e-mail: avargasl@javeriana.edu.co

ANA SANTOS

Universidad Nacional de Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. e-mail: acsantosr@gmail.com

EDER CÁRDENAS

Pontificia Universidad Javeriana. e-mail: eder.cardenas@javeriana.edu.co

NELSON OBREGÓN

Pontificia Universidad Javeriana. e-mail: nobregon@javeriana.edu.co

Recibido para revisar noviembre 17 de 2010, aceptado abril 29 de 2011, versión final mayo 5 de 2011

RESUMEN: En el diseño y manejo de sistemas de drenaje urbano es necesario conocer la distribución espacial de la precipitación. Para obtener esta información, en la ciudad de Bogotá se emplean con frecuencia métodos de interpolación cuya entrada son los registros puntuales de estaciones pluviométricas o pluviográficas. En el presente trabajo se presenta una revisión de los parámetros básicos que los modeladores deben asumir antes de realizar una interpolación espacial. Se utilizó información diaria y subhoraria, considerando los métodos de la distancia inversa cuadrática, Kriging y V4 de MATLAB®. Los resultados obtenidos permiten definir algunos criterios sencillos en cuanto a la orientación de la malla, el tamaño de la celda a emplear, el análisis estructural previo que debe realizárse a la información y el método de interpolación a utilizar.

PALABRAS CLAVE: Campos de precipitación, Geoestadística, patrones espaciales, interpolación espacial, variabilidad espacio-temporal.

ABSTRACT: In the urban drainage systems design and management, the knowledge of the rainfall spatial distribution is required. To obtain this information, in the city of Bogotá are often used interpolation methods whose inputs are punctual data recorded in rainfall stations. This paper presents a review of the basic parameters that modelers should take into account before performing a spatial interpolation. Daily and hourly information was used, considering the inverse distance squared, Kriging and MATLAB® V4 methods. The obtained results allow us to define some simple on the orientation of the mesh, the cell size to be used, the previous structural analysis of the information and the interpolation method.

KEYWORDS: Rainfall fields, Geostatistics, spatial patterns, spatial interpolation, space-time variability.

1. INTRODUCCIÓN

El papel de la precipitación en la hidrología urbana es fundamental, debido a que la ocurrencia de éste fenómeno genera la escorrentía y el transporte de sedimentos en las urbes del planeta. La alta variabilidad espacio-temporal de la precipitación constituye una fuente importante de incertidumbre en la modelación hidrológica de estos hidrosistemas, lo cual implica que las cuencas urbanas requieran mediciones de precipitación con una alta resolución espacial y temporal [1-2], insumo que no siempre está disponible en las ciudades latinoamericanas.

En la operación de sistemas de drenaje pluvial se debe incluir de manera simultánea la conducción del agua proveniente de la escorrentía sin generar inundaciones y

el control de las descargas de sedimentos y contaminantes en cuerpos de agua receptores; aspectos analizados con los sistemas de control en tiempo real y los estudios de eventos pasados con el fin de preparar las estrategias de control y/o diseño de nuevas redes [3]. De esta manera, la observación e interpretación de los patrones espaciales de precipitación (campos de precipitación) son fundamentales en la planeación y operación de estos sistemas de drenaje [4-5].

En la ciudad de Bogotá el registro de la precipitación se realiza en estaciones de medición puntual, mediante instrumentos de medición discreta o continua. En la práctica es necesario conocer su variación espacial en un área de estudio, para lo cual deben construirse campos de precipitación empleando metodologías de interpolación,

tales como el método de Kriging, el método IDW (Inverse Distance Weighted) y el método V4 (Desarrollado en MATLAB® basado en las funciones de Green).

Con el desarrollo de los sistemas de información, el procedimiento de interpolación resulta relativamente simple, sin embargo, las consideraciones previas para llevar a cabo dicho proceso no lo son. Por consiguiente el objetivo del presente trabajo consiste en brindar a los modeladores en hidrología, información básica de los procesos de interpolación y la generación de campos de precipitación apropiados en centros urbanos. Sin pérdida de generalidad se analizarán los registros de precipitación puntual en la ciudad de Bogotá, considerando diferentes resoluciones espaciales y temporales bajo la perspectiva de varios métodos de interpolación.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en la zona central de Colombia, en el altiplano Cundiboyacense de la Cordillera Oriental. Su localización está dada por las coordenadas $4^{\circ} 35' 53''$ N $74^{\circ} 4' 33''$ W y altitud de 2630 msnm. Bogotá tiene un área total de 1776 km² y su casco urbano se extiende en más de 40 km a lo largo de la sabana en el sentido norte-sur y en 20 km en el sentido este-oeste.

La ciudad tiene como límites naturales los llamados Cerros Orientales en el costado este y el río Bogotá en el costado occidental (Ver Figura 1). Se caracteriza por tener un régimen bimodal de precipitaciones que varían entre 800 y 1200 mm y una temperatura promedio de 13 °C, con un rango de 7 a 18 °C.

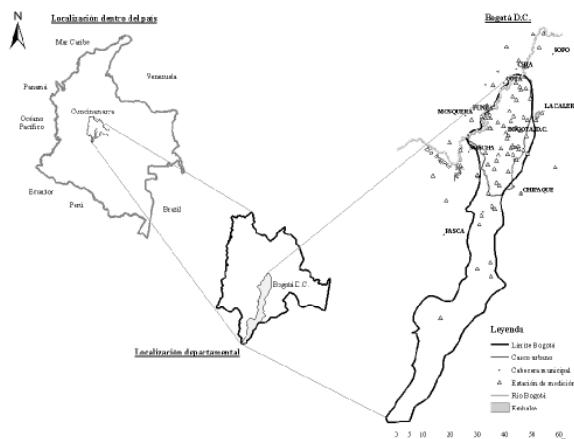


Figura 1. Zona de estudio
Figure 1. Study area

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las estaciones seleccionadas para el desarrollo del presente estudio son de tipo meteorológica especial (ME), sinóptica principal (SP), pluviométrica (PM), climatológica principal (CP), pluviográfica (PG) y climatológica ordinaria (CO). En la Tabla 1 se presentan las estaciones empleadas en el estudio. Los registros hacen parte de la base de datos de las entidades encargadas de recolectar y distribuir la información en la ciudad de Bogotá: Corporación Autónoma Regional (CAR), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales (IDEAM) y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). En resumen se consideraron 77 estaciones con precipitación diaria y 37 estaciones con precipitación sub-horaria.

El período de simulación fue elegido de acuerdo con la disponibilidad y calidad de la información ofrecida por parte de las entidades operadoras de las estaciones, considerando adicionalmente los siguientes criterios: 1) validación de la información pluviográfica con la pluviométrica, 2) análisis de consistencia de la información, y 3) Identificación de los eventos teniendo en cuenta el tiempo mínimo entre eventos [6]. Dicho período está comprendido entre el 1 de enero de 1995 y el 31 de diciembre de 1996.

Tabla 1. Estaciones empleadas (Período 1995–1996)

Table 1. Stations used (Period 1995–1996)

	Resolución temporal	Número de estaciones	Densidad* (km ² /estación)
Diaria	CAR	18	12
	EAAB	28	
	<u>IDEAM</u>	<u>31</u>	
	Total	77	
Subhoraria	EAAB	27	22
	<u>IDEAM</u>	<u>10</u>	
	Total	37	

* Área del casco urbano = 560,79 km².

De acuerdo con la *World Meteorological Organization* [7], se ha establecido que para la existencia de una red pluviométrica óptima en zonas urbanas se debe contar al menos con un pluviómetro cada 10 a 20 km², mientras que algunos autores argumentan que la densidad de estaciones debe ser de 6 km² por estación.

De acuerdo con la Tabla 1 para el caso de Bogotá se cumple el requerimiento de densidad de estaciones. No obstante, debido a la alta variabilidad de la precipitación en esta ciudad se sugiere considerar la instalación de más estaciones pluviométricas y pluviográficas además de la intensificación de la toma de datos con otras técnicas de medición como los sensores remotos.

Con el fin de encontrar patrones del comportamiento de los vientos en Bogotá, que contribuyan al entendimiento de la precipitación (posibles direcciones predominantes), se estudiaron los registros de 9 estaciones pertenecientes a la Red de monitoreo de Calidad del Aire (RCA) de Bogotá. El período disponible de esta información de viento está comprendido desde el año 1997 a 2002 con valores de dirección y magnitud de viento cada 10 minutos. A pesar que el período de registro de las estaciones de viento no coincide con el de precipitación, esta información se utilizó para verificar si existía algún comportamiento predominante en los patrones de viento, aspecto que no pudo establecerse de manera clara.

Para la generación y comparación de los campos de precipitación se emplearán los métodos de interpolación de IDW (distancia inversa ponderada), Kriging y V4.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Parámetros para interpolaciones

4.1.1 Orientación de la Malla

Partiendo del sistema de coordenadas planas con orientación Norte-Sur, se exploraron otras alternativas de orientación de malla que mejorara la representación de los campos de precipitación, se sugirió establecer un patrón espacio-temporal de los vientos en el casco urbano. Se analizaron los registros de dirección y magnitud del viento en el período comprendido entre los años 1997 y 2006 mediante la elaboración de rosas de los vientos para cada uno de los años y otras agregando la información de las series.

Inicialmente se sugirió que la orografía y la temporada (mes, trimestre, semestre, día, noche, etc.) jugarían un papel importante en la definición de un patrón de la dirección de los vientos en Bogotá. No obstante, al observar que no había una suficiente correlación, a la luz de los escasos datos, que permitiera vincular dichos procesos con el análisis espacio-temporal, se decidió mantener el sistema de coordenadas planas

con orientación Norte-Sur como sistema de referencia para las interpolaciones a realizar.

4.1.2 Tamaño de Celda

Para definir el ancho de celda con el que se visualizan los campos de precipitación (mapas formato raster) se analizaron 19 tormentas ocurridas en la ciudad de Bogotá. Para cada una de las ellas se estimó la distancia en la que el centro de tormenta se moviliza en intervalos de tiempo de 10 o 15 minutos. El centro de tormenta se definió como el primer momento estadístico bidimensional, descrito por (1).

$$R_{CM} = \frac{\sum_i p_i \cdot r_i}{\sum_i p_i} = \frac{1}{P} \cdot \sum_i p_i \cdot r_i \quad (1)$$

Donde R_{CM} es la coordenada norte o este del centro de tormenta, p_i es la precipitación registrada en la estación i , P es la precipitación total registrada en cada intervalo, y r es la coordenada norte o este de la estación i . En total se analizaron 19 eventos, de los cuales 17 pertenecen al período elegido, los otros dos eventos se estudiaron por considerarse de magnitud y duración considerable. En la Figura 2 se presentan las frecuencias de las distancias mínimas en las que se movió el centro de tormenta para los 19 eventos analizados con intervalos de 30 minutos.

Tomando en cuenta que para escalas espaciales mayores a 1 km^2 , varios autores han reportado la importante variabilidad espacial y temporal de la precipitación no se consideraron resoluciones de celda mayores o iguales a 1000 metros siendo éste el caso más frecuente (Figura 2). Con base en esta figura se incluyeron en el análisis distancias de 100, 200, 250 y 500 metros.

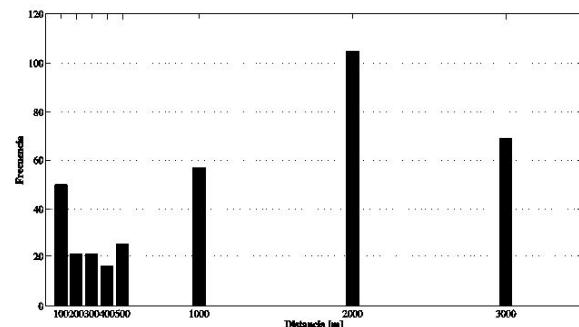


Figura 2. Frecuencia de la mínima distancia de desplazamiento del centro de tormenta

Figure 2. Frequency of minimum offset distance from the storm center

Con el análisis de los desplazamientos de los centros de tormenta sobre la ciudad de Bogotá se observó que no existe una dirección predominante de los mismos y que por lo general se concentran en la zona del centro de la ciudad.

4.1.3 Análisis Estructural de los Datos

A nivel diario se realizó el análisis estructural de una serie de días en los que se presentaron valores altos de precipitación, comprendidos en la segunda temporada de lluvia de Bogotá. El software utilizado para dicho análisis es el GS+, que se distribuye libremente en la red en el sitio: <http://www.gammadesign.com/>. Se estimaron los semivariogramas experimentales con el fin de elegir el modelo teórico que mejor representara el fenómeno. En la Tabla 2 se presentan los parámetros de los semivariogramas obtenidos a partir de la precipitación diaria.

Tabla 2. Parámetros del semivariograma para precipitación diaria

Table 2. Semivariogram parameters for daily precipitation

Zona	Fecha	Modelo	Alcance [m]	R ²
Casco urbano	21/09/1995	Gaussiano	1260	0,04
	22/09/1995	Gaussiano	65900	0,59
	24/09/1995	Gaussiano	4190	0,70
(50 est.)	30/09/1995	Esférico	1680	0,18
Todas	21/09/1995	Gaussiano	78900	0,66
	22/09/1995	Gaussiano	13920	0,97
	24/09/1995	Esférico	7800	0,51
	30/09/1995	Exponencial	7500	0,46

En la Tabla 2 se observa la variación del modelo de ajuste y del orden de magnitud del alcance entre días consecutivos. Al realizar el análisis estructural para un mismo día con condiciones diferentes de número de estaciones, se observa que el mejor desempeño se obtuvo para el día 22 de septiembre de 1995.

En la estimación de los semivariogramas del análisis estructural se encontró que no existe una dirección

predominante en los semivariogramas direccionales. Para este caso se recomienda utilizar semivariogramas isotrópicos para el ajuste a los modelos teóricos.

4.1.4 Cobertura Espacial de la Interpolación

Con el fin de disminuir la incertidumbre de los valores interpolados en las fronteras de un campo de precipitación calculado (interpolado a partir de registros en superficie) se recomienda que se disponga de estaciones localizadas fuera de la zona de interés. De esta manera se logra que al momento de hacer la interpolación se cuente con más información, para luego hacer el “recorte” de la zona de estudio.

Adicionalmente se recomienda que la dirección y localización de las líneas de coordenadas consideren las malla de otras fuentes de información tales como la de la Misión de Medición de Lluvias tropicales (TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission* por sus siglas en inglés) y de radares meteorológicos eventualmente instalados en el futuro. Esto facilitaría labores de asimilación de datos a diferentes escalas espaciales y temporales.

4.2 Interpolación Espacial y Validación Cruzada

En esta sección se hace una breve revisión de los diferentes métodos de interpolación y se presenta la estrategia para la selección de método más apropiado apoyándose en validación cruzada.

4.2.1 Métodos de Interpolación

La precipitación es un fenómeno que tiene un fuerte componente geográfico, el estudio de la existencia de patrones espaciales puede contribuir al asentamiento de bases que contribuyan al estudio de la variabilidad de la lluvia. En localidades como Bogotá, donde la medición de la precipitación se hace de manera puntual es necesario conocer la precipitación como si fuera un campo continuo en el que para cualquier punto se tenga un valor de precipitación.

La interpolación espacial es un procedimiento matemático utilizado para estimar el valor de un atributo, en este caso, la precipitación, en una localidad o ‘celda’ a partir de valores obtenidos en puntos de medición. En el caso de la precipitación la interpolación espacial transforma un número finito

de observaciones de las estaciones pluviográficas, en un espacio continuo de manera que su patrón espacial sea comparable con aquel presentado por las observaciones puntuales de origen [8-9-10].

Para la ciudad de Bogotá, Rodríguez et. al [11] han estudiado los efectos de la utilización de diferentes técnicas de interpolación espacial. Es importante aclarar que la calidad de los resultados de la interpolación espacial del campo de precipitación depende fundamentalmente de la calidad de los datos, del número y distribución de los pluviógrafos utilizados y del método a utilizar.

En esta investigación la evaluación de los métodos de interpolación se realizará mediante la comparación de los resultados obtenidos por cada uno de ellos, siguiendo dos criterios: Estadística global (verificando el grado de ajuste al modelo real por medio de validaciones cruzadas) y Evaluación visual (estableciendo de manera cualitativa los patrones de comportamiento de sus isolíneas y superficies).

Dentro de la literatura se encuentran diferentes métodos de interpolación. Éstos son clasificados en globales y locales, de acuerdo con la cantidad de información que utilizan, y en exactos e inexactos, según el valor de las estimaciones respecto a los datos de origen. En la presente investigación se evaluarán: a) Kriging, b) Inverso de la distancia y c) V4 (Método MATLAB ®).

4.2.2 Validación cruzada Un aspecto importante en la selección de la metodología de interpolación más representativa es la validación de los campos de precipitación generados. Para realizar esta selección se realizó un procedimiento de validación cruzada, empleando los registros de 5 estaciones localizadas dentro de la zona de estudio. El criterio de selección de las estaciones se basó en la extracción de por lo menos una estación de las siete zonas hidrológicas propuestas en el estudio de IRH (1995) de zonificación por índices pluviográficos para la ciudad de Bogotá.

Las estaciones seleccionadas son: El Granizo (IDEAM), Sta. María de Usme (IDEAM), Fontibón (EAAB), CASD (IDEAM) y UNAL (IDEAM). Estos registros no se emplearon en la etapa de interpolación, con el fin de identificar el ajuste de las metodologías empleadas. Para

realizar esta validación cruzada se consideraron dos aspectos importantes: la frecuencia de éxito de cada metodología y la precisión en las predicciones realizadas.

El parámetro de comparación empleado en este análisis fue la sumatoria del valor absoluto del error entre el valor estimado y el valor registrado, para cada uno de los 731 días modelados, en las 5 estaciones consideradas. La selección de la mejor metodología se realizó de dos formas, la primera de ellas en función de la frecuencia de éxito (número de días de éxito/número total de días); y la segunda, seleccionando el menor error acumulado. Ambos criterios se aplicaron en todos los días registrados y en las estaciones definidas anteriormente. Los resultados de esta validación cruzada se presentan en la Tabla 3 para los diferentes tamaños de celda (Δx) considerados, estandarizando los valores acumulados del error dividiéndolos entre el número de días (mm/día).

Con base en los resultados consignados en la Tabla 3, se observa que con el método IDW se obtiene la menor diferencia entre los valores estimados y los registrados. En general puede apreciarse que con el método V4 se obtienen diferencias sustanciales, aspecto que se evidencia en las altas sumatorias del error obtenidas, para los dos criterios considerados.

Tabla 3. Comparación de metodologías de interpolación

Table 3. Interpolation methodologies comparison

Δx (m)	Frecuencias		Error	
	Método	Σ Error	Método	Σ Error
100	IDW	5.37	IDW	5.37
200	Kriging*	5.63	Kriging*	5.63
250	V4	8.03	IDW	5.46
500	IDW	5.33	IDW	5.33

* Se empleó un semivariograma lineal.

Adicionalmente, se analizaron los diagramas de dispersión para los casos considerados, los cuales se presentan en las Figuras 3 y 4.

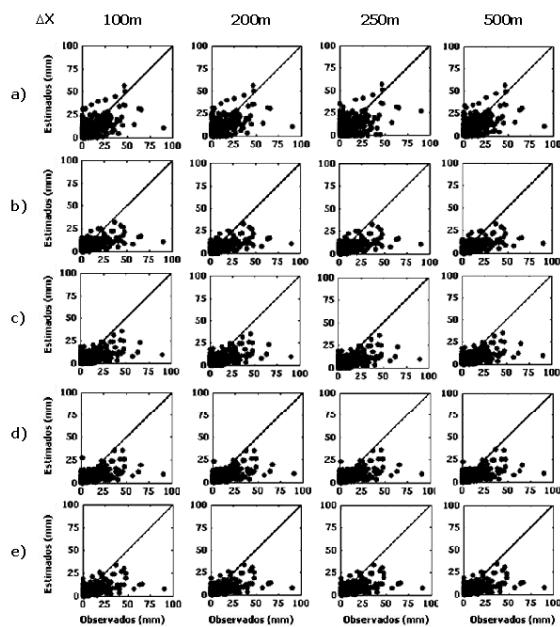


Figura 3. Comparación del ajuste del método de Kriging variando el tamaño de celda y el semivariograma. a) lineal, b) gausiano fijo, c) gausiano ajustable, d) esférico ajustable y e) exponencial ajustable.

Figure 3. Fitness comparison of the Kriging method with cell size and semivariogram variation. a) linear, b) fixed gaussian, c) adjustable gaussian, d) adjustable spherical and e) adjustable exponential.

En la Figura 3 se presentan los diagramas de dispersión, obtenidos a partir del método de Kriging, entre los valores de precipitación estimados y los valores registrados (en las 5 estaciones empleadas para la validación cruzada) para cada uno de los tamaños de celda considerados, comparando adicionalmente, los diferentes semivariogramas empleados. La propiedad “ajustable” y “Fijo” de esta Figura se refiere a si se realizó el ajuste de los parámetros de ese modelo teórico para cada día, o si se consideraron invariantes en el tiempo.

En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos en los diagramas de dispersión de la Figura 3.

Tabla 4. Correlación del método de Kriging empleando diferentes semivariogramas

Table 4. Correlation of the Kriging method considering different semivariograms

Semivariograma	ΔX (m)			
	100	200	250	500
Lineal	0,705	0,703	0,578	0,709
Gausiano fijo	0,702	0,702	0,701	0,701
Gausiano ajustable	0,688	0,688	0,689	0,689
Esférico ajustable	0,696	0,698	0,699	0,699
Exponencial ajustable	0,688	0,687	0,688	0,687

Los coeficientes de correlación de la Tabla 4 permiten evidenciar que el mejor modelo teórico de semivariograma obtenido para la metodología de Kriging es el lineal, lo cual indica que el ajuste de los parámetros de un semivariograma en cada instante del período considerado no mejora sustancialmente su desempeño.

Tomando los resultados obtenidos por el método de Kriging empleando un semivariograma lineal y los otros métodos considerados en el presente trabajo se obtuvieron los diagramas de dispersión que se presentan en la Figura 4.

En la Tabla 5 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos en los diagramas de dispersión de la Figura 4.

Con base en los diagramas presentados en la Figura 4 y los coeficientes de correlación de la Tabla 3, puede observarse que el método IDW obtiene los mejores resultados para 3 de los tamaños de celda considerados (100, 250 y 500 m), mientras que para el tamaño de celda de 200 m, el método de Kriging obtiene el mejor ajuste. El método V4 exhibe el menor ajuste para todos los tamaños de celda considerados.

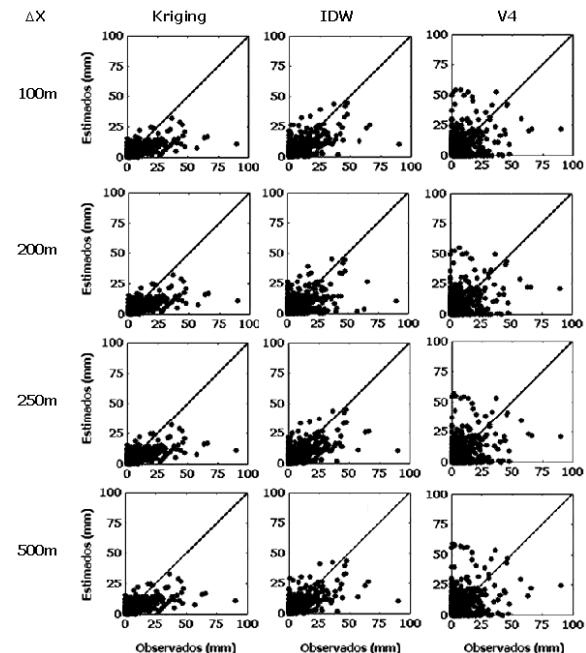


Figura 4. Variación del ajuste de acuerdo con el método de interpolación espacial utilizado

Figure 4. Fitness variation according to the interpolation method

Tabla 5. Correlación obtenida en función del método y el tamaño de celda

Table 5. Correlation obtained considering the method and cell size

Método	ΔX (m)			
	100	200	250	500
Kriging*	0,705	0,703	0,578	0,709
IDW	0,727	0,633	0,722	0,735
V4	0,458	0,485	0,483	0,486

* Se empleó un semivariograma lineal.

De la Figura 4 y la Tabla 5 puede resaltarse también que las diferencias en los ajustes obtenidos por los métodos IDW y Kriging para 100 y 500 m no son sustancialmente diferentes, presentando un mejor desempeño para un tamaño de celda de 500 m, aspecto que también implica un menor tiempo computacional.

4.3 Generación de campos de precipitación

Mediante la inspección visual de los campos de precipitación generados, se evidencian las diferencias en los comportamientos de cada una de las metodologías empleadas. En la Figura 5 se comparan los campos obtenidos para cada una de las tres metodologías para el caso de la precipitación total presentada el 13 de mayo de 1996. Para este caso la imagen de la interpolación con IDW representa con mayor aptitud los lugares con altas precipitaciones o centros de tormenta, cabe anotar que estos sitios son aproximados al lugar geográfico de la estación que registró el valor de precipitación.

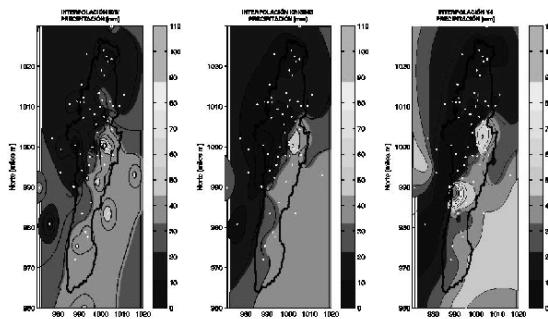


Figura 5. Campos de precipitación obtenidos (para el evento registrado en 13-05-1996)

Figure 5. Rainfall fields obtained (for the event recorded in 13-05-1996)

En la Figura 5 se observa que la interpolación realizada con el método de Kriging (Modelo Lineal) suaviza las regiones donde se observaban los centros de tormenta,

generalizando toda la zona, ello implica en el caso de la distribución de las estaciones en la ciudad de Bogotá una sobreestimación de la precipitación.

En el campo de precipitación generado con el modelo V4 (Véase Figura 5), se observa que las precipitaciones interpoladas superan las de los modelos anteriores en casi el doble. De otro lado también se observa una zona de gran extensión con precipitación igual a cero.

Con base en el análisis anterior a resolución diaria y teniendo en cuenta que el método de interpolación que obtuvo el mejor desempeño fue IDW, se procedió a emplear este método en la interpolación del campo de precipitación para un evento comprendido entre el 12 de abril a las 10:00 horas y el 13 de abril a las 4:40 horas del año (véase Figura 6).

Para el evento considerado, los valores más altos de precipitación ocurren en la zona oriental de la ciudad, siendo un claro indicio de la influencia de la orografía en el comportamiento de las lluvias para Bogotá.

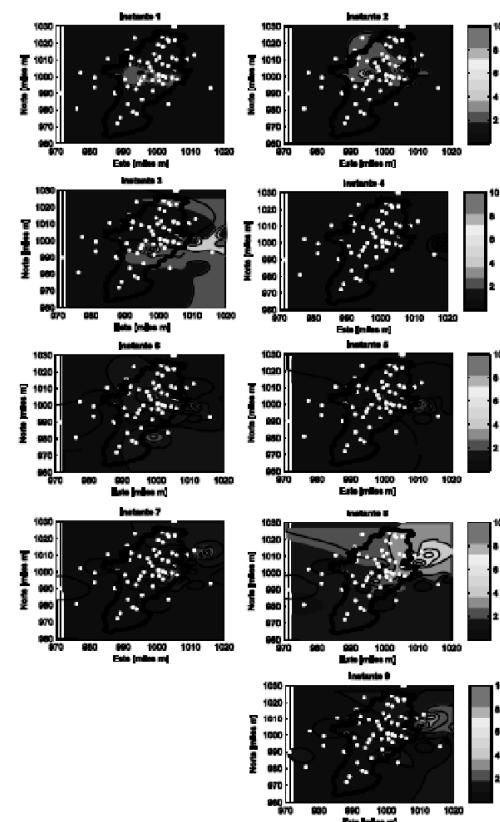


Figura 6. Evolución de tormenta registrada entre el 12 y el 13 de abril de 1996. $\Delta t=2$ h. (Los puntos blancos identifican las estaciones de medición)

Figure 6. Storm evolution for the event recorded between April 12th and 13th 1996. $\Delta t=2$ h. (White points identify the rainfall stations)

4.4 Discusión

Debido a la necesidad de realizar estudios del comportamiento de la precipitación a nivel espacial y por ende en un campo continuo, se requiere la implementación de métodos para la construcción de dichos campos cuando la medición de esta variable se hace de manera puntal en superficie. La baja densidad de la red de monitoreo ($\text{km}^2/\text{estación}$) implica una alta incertidumbre espacial al tener que generar los campos de precipitación con técnicas de interpolación.

Con el fin de mejorar los campos de precipitación estimados por los algoritmos de interpolación, se proponen en este trabajo algunas consideraciones en la definición del tamaño de celda, la alineación de la malla y una metodología de validación cruzada. El análisis del desplazamiento de los centros de tormenta permitió evidenciar la complejidad del fenómeno en estudio y permitió seleccionar el tamaño de celda de los campos de precipitación por generar. Se sugirió que el tamaño apropiado del tamaño de las celdas no excediera la distancia mínima del movimiento del centro de tormenta. Bajo este supuesto se analizaron 19 tormentas y se estableció que el tamaño de celda fuera de 500 metros, distancias inferiores implican mayor tiempo computacional que no mejora de manera contundente los resultados de la validación cruzada.

La aplicación de los métodos de interpolación considerados (IDW, V4 y Kriging) con variaciones en el tamaño de celda ha permitido concluir que para el periodo de estudio el mejor desempeño lo tiene el método IDW, corroborando adicionalmente el tamaño de celda seleccionado. Esta selección se llevó a cabo mediante un proceso de validación cruzada en la que se extrajeron del cálculo de la interpolación espacial cinco estaciones de precipitación diaria localizadas estratégicamente en 5 zonas de la ciudad de Bogotá de las 77 empleadas, para luego comparar el valor estimado con el observado en las posiciones de estas estaciones.

Para el caso de la interpolación con el método de kriging y al realizar el análisis estructural a nivel de precipitación diaria se encontró que en una serie de registros consecutivos no existe un modelo teórico de semivariograma que se mantenga en el tiempo como el de mejor desempeño. De manera sorpresiva se encontró también que el modelo de semivariograma lineal es el que genera menores errores entre este tipo de estimadores kriging.

5. CONCLUSIONES

Como primer resultado de la presente investigación respecto a la estimación de los campos de precipitación en la ciudad de Bogotá, se obtuvieron los siguientes parámetros de interpolación: orientación de la malla norte-sur para una extensión de 70 km por 50 km y resolución espacial de 500 metros de tamaño de celda. Se encontró adicionalmente que el método IDW es el que mejor representa el comportamiento espacial de la precipitación debido a que se obtienen los menores errores absolutos en la comparación de los valores interpolados con los observados.

Cada uno de los métodos empleados para la estimación de los campos de precipitación tiene una serie de ventajas y desventajas. En cuanto al número de puntos de muestreo, el modelo de Kriging requiere un elevado número de estaciones con registros, mientras que los modelos IDW y V4 no tienen restricciones en este aspecto. Este resultado debe hacer reflexionar a los modeladores que emplean la metodología de Kriging de manera indiscriminada.

En el caso específico de la presente investigación se observó que el modelo que genera mayores sobreestimaciones de precipitación es el V4, seguido por el método de Kriging. El modelo IDW no genera sobreestimaciones de la precipitación, sin embargo, produce concentraciones bastante fuertes en los puntos de medición.

En cuanto a la implementación en aplicativos computacionales los modelos más sencillos de programar son el V4 e IDW, los cuales fueron implementados por los autores en MATLAB®. El método de Kriging por la cantidad de parámetros y la variación bajo las condiciones de número de estaciones y rangos de precipitación requiere mayor tiempo computacional y una programación más avanzada, sin que este esfuerzo produzca mejores resultados.

Con los resultados presentados en este trabajo se evidencia la responsabilidad con que los modeladores de sistemas de drenaje urbano deben asumir el proceso de interpolación en la generación de campos de precipitación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente estudio expresan sus agradecimientos a los ingenieros Fabio Bernal y Víctor Peñaranda, quienes aportaron parte de la

información pluviográfica que fue de gran importancia para el desarrollo de la investigación. A la Pontificia Universidad Javeriana que aportó importantes recursos para la digitalización de la información, mediante el proyecto de investigación: “Avances en la caracterización y modelación conceptual de la meteorología de la ciudad de Bogotá”, identificado con el código 12010M50401200.

REFERENCIAS

- [1] BERNDTSSON, R. AND NIEMCZYNOWICZ, J. Spatial and temporal scales in rainfall analysis - Some aspects and future perspectives, *J. Hydrol.*, 100(1-3), 293-313, 1988.
- [2] BERNE, A., DELRIEUB, G., CREUTINB, J-D. AND OBLEDDB, CH. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology, *J. Hydrol.*, 299(3-4), 166-179, 2004.
- [3] THIELEN, J. AND CREUTIN, J.-D. An urban hydrological model with high spatial resolution rainfall from a meteorological model, *J. Hydrol.*, 200(1-4), 58-83, 1997.
- [4] BACCHI, B. AND KOTTEGODA, N.T. Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall, *J. Hydrol.*, 165(1-4), 311-348, 1995.
- [5] VARGAS A. Y GARCÍA O. Análisis espacio-temporal de la precipitación media mensual. *Memorias XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de indias, Colombia, Octubre de 2008.
- [6] BERNAL, F.A. Desarrollo de modelos conceptuales y computacionales para simular estocásticamente la dinámica espacio - temporal de la precipitación en Bogotá. Director: Nelson Obregón Neira. Tesis de Maestría en Recursos Hidráulicos: Universidad Nacional de Colombia. 2008.
- [7] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology - From Measurement to Hydrological Information, WMO-No. 168, Sixth edition, 2008.
- [8] CLARK, I., Practical Geostatistics, Blackwell Science, 1979.
- [9] ISAAKS, E. AND SRIVISTAVA, R., Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 1989.
- [10] CARR, J., Numerical Analysis for the Geological sciences, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [11] RODRÍGUEZ, E., CAMACHO, L. Y VILLAREAL, J. Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en una microcuenca urbana. *Memorias XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Bogotá D.C., 2008.