

# Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en una microcuenca urbana, Bogotá, Colombia

Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação em uma microbacia urbana, Bogotá, Colombia

Spatial and Temporal Rainfall Variability in a Small Urban Watershed, Bogotá, Colombia

Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval\*

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Luis A. Camacho B.

Jacobo Villarreal P., Alejandro Jiménez,  
Ana Carolina Santos R. y María del Pilar Duarte B.

## Resumen

Los diseños de alcantarillados pluviales y combinados normalmente se realizan bajo el supuesto de que la precipitación es constante en tiempo y espacio para áreas inferiores a 1 km<sup>2</sup>. Con el fin de aportar al conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en cuencas urbanas de este tipo, y de determinar su impacto en el diseño de alcantarillados y, más aún, en los caudales de escorrentía obtenidos a partir de la aplicación de modelos matemáticos rigurosamente calibrados y validados, se ha instrumentado densamente la microcuenca urbana del campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. En este artículo se describen los análisis detallados del evento más importante en términos de intensidad y precipitación total.

**Palabras clave:** hidrología urbana, variabilidad espacial y temporal de la precipitación, aplicación de técnicas geoestadísticas, microcuenca urbana, microclima.

## Resumo

Os desenhos combinados de redes de esgoto de águas pluviais são normalmente realizados sob o pressuposto de que a precipitação é constante no tempo e no espaço para áreas de menos de 1 km<sup>2</sup>. Para proporcionar o conhecimento da variabilidade espaço-temporal das chuvas nessas bacias, e determinar o seu impacto sobre a concepção de esgotos, e ainda mais no fluxo de enxurrada produzida a partir da aplicação de modelos matemáticos rigorosamente calibrados e validados, tem sido fortemente instrumentada a microbacia urbana do campus da Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Este artigo descreve a análise detalhada do evento mais importante em termos de intensidade e de precipitação total.

**Palavras-chave:** hidrologia urbana, variabilidade espacial e temporal da precipitação, aplicação de técnicas geoestatísticas, microbacia urbana, microclima.

## Abstract

The design of combined and stormwater sewer systems is usually accomplished assuming that rainfall is uniform in time and space for areas smaller than 1 km<sup>2</sup>. This paper aims to contribute to the knowledge of the space/time rainfall variability in urban basins of this kind. We investigate the impact of such variability on the design of sewage systems and, more importantly, on the runoff flows obtained through mathematical models rigorously calibrated and validated. Our case of study, the campus of the Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, was densely instrumented. Among the events thus recorded, we have analyzed one of the most important in terms of intensity and total rainfall. This paper describes the detailed results.

**Keywords:** urban hydrology, spatial and temporal rainfall variability, geospatial analysis techniques, urban basins, microclimate.

RECIBIDO: 5 DE MAYO DEL 2008. ACEPTADO: 28 DE MAYO DEL 2008.

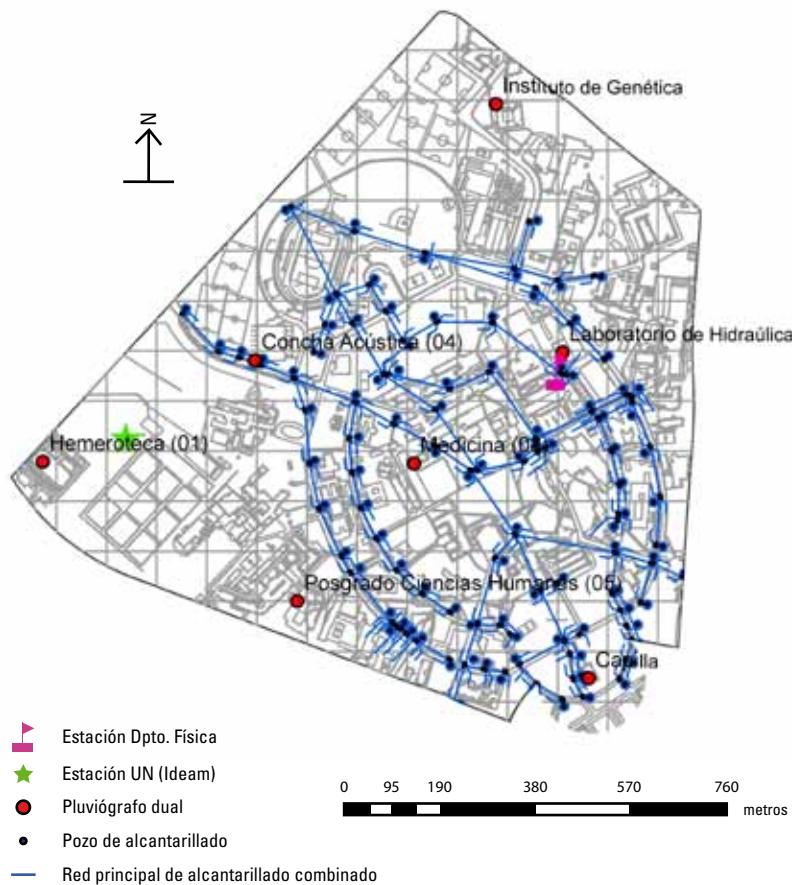
Artículo de investigación sobre la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, dicha investigación fue llevada a cabo en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

\* Dirección postal: carrera 30 n.º 45-03, edificio 453.  
Correo electrónico: earodriguezs@unal.edu.co

## Introducción

El problema de escala en hidrología y meteorología, entendido como aquel asociado con el cambio de las propiedades estadísticas espaciales de una variable por efecto del tamaño del área o del intervalo de tiempo considerado (Dubayah *et al.* 1996), ha recibido importantes consideraciones en la literatura (Bergstrom *et al.* 1998; Kite y Haberlandt 1999; Wood 1998). En estos estudios, conducidos fundamentalmente a escala de cuenca y a escala regional, se ha demostrado e intentado parametrizar la importante variabilidad espacial y temporal que existe en la humedad del suelo, la evaporación, la escorrentía y la precipitación, entre otros.

En la mayoría de las aplicaciones que utilizan modelos hidrológicos para estimar la escorrentía en sitios no instrumentados, a partir de registros de precipitación, estos se constituyen en el factor más importante y con mayor incertidumbre en el proceso de modelación (Beven 2001; Berne *et al.* 2004). Considerando la baja densidad de las redes de medición de precipitación existentes, es común utilizar una sola estación para determinar la precipitación puntual y, a partir de ella, utilizando coeficientes empíricos de reducción por duración de la tormenta y tamaño del área (normalmente obtenidos en otras latitudes), estimar la precipitación areal sobre una cuenca. Para el caso particular de diseño de alcantarillados combinados y pluviales, comúnmente se asume que el campo de precipitación es uniforme en tiempo y espacio para un evento de tormenta sobre áreas inferiores a  $1 \text{ km}^2$  y que, por tanto, es válido aplicar el bastante antiguo “méto-



**Figura 1.** Mapa de la microcuenca del campus de la Universidad Nacional de Colombia que incluye red de drenaje y localización de estaciones meteorológicas existentes e instaladas en este proyecto.

do racional” (Mulvaney 1850) para estimar los caudales de diseño. Sin embargo, el reducido tamaño de las microcuencas urbanas y el carácter de los procesos hidrológicos a nivel urbano, como la rápida respuesta de la escorrentía en áreas impermeables, requiere y amerita un análisis de la precipitación a escalas espaciales y temporales detalladas.

Para escalas espaciales mayores a  $1 \text{ km}^2$ , varios autores han reportado la importante variabilidad espacial y temporal de la precipitación (Butyaert *et al.* 2006; Segond *et al.* 2006; Vaes *et al.* 2005). Sin embargo, para el caso de pequeñas cuencas urbanas, y específicamente en el caso de la ciudad de Bogotá, solo existe un estudio (Uniandes 2001)

relativamente corto, en el que se ha mostrado la importante variabilidad de la precipitación en este tipo de microcuencas urbanas. Así, el presente estudio pretende contribuir al conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en estas cuencas. Para ello, se ha instrumentado densamente el campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, utilizando 14 pluviógrafos de balancín, con precisión de 0,2 mm ubicados de forma dual en las cubiertas de siete edificios del campus y distribuidos de forma más o menos uniforme sobre un área de  $1,2 \text{ km}^2$ .

En la estimación del campo de precipitación sobre un área, existen errores inherentes al proceso de



**Figura 2.** Foto del campus suministrada por la Oficina de Planeación UN, sede Bogotá (sin escala).

medición (Sevruk y Nespor 1998), al proceso de interpolación utilizado para espacializar las mediciones puntuales sobre el área (Butyaert *et al.* 2006) y a la naturaleza aleatoria del campo de precipitación. Con el fin de reducir la incertidumbre en los registros puntuales de precipitación, se ha diseñado e implementado una estación de calibración de pluviógrafos en laboratorio, utilizando las recomendaciones de Vasvári (2005), que permite realizar rutinariamente la recalibración de los aparatos. Con este mismo fin, se han ubicado mecanismos duales de precipitación en cada sitio que aseguran la existencia de un pluviógrafo testigo contra el cual se pueden comparar los registros del

pluviógrafo contiguo. Con respecto a la incertidumbre debida a los métodos de interpolación, el estudio ha intentado evaluar las bondades y limitaciones de tres métodos que por sus características tienen diferentes niveles de complejidad y que son: el método del inverso de la distancia, el método de interpolación polinomial y el método estocástico de interpolación, denominado *kriging*. Los tres métodos han sido utilizados para interpolar valores totales de precipitación, y el de *kriging*, para interpolar intensidades máximas en 15 minutos (tiempo aproximado de retardo de la cuenca, estimado a partir de hidrógrafas y eventos de tormenta registrados) para el evento seleccionado. En re-

lación con el carácter aleatorio de la precipitación, y considerando que una tormenta está conformada por celdas productoras de precipitación, que aparecen y decaen a medida que transcurre el evento, es imposible intentar reducir los errores asociados.

### Área de estudio

Considerando las características del campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, su localización central dentro de la ciudad y la facilidad de instrumentación y de la realización de las tareas periódicas de recolección de información y de recalibración de equipos, se ha seleccionado esta microcuenca como el área de estudio (figura 1). La microcuenca tiene un área de 1,2 km<sup>2</sup> con un 60% en zonas verdes y la parte restante en zonas impermeables (zonas duras y cubiertas, figura 2). El sistema de drenaje de la microcuenca es del tipo combinado (aguas residuales domésticas y pluviales drenadas por la misma tubería), con dos entradas exteriores importantes, una a la altura de la calle 26 y otra en cercanías del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (LEH), que definen dos diferentes redes de drenaje con salidas a la red de alcantarillado de la EAAB, una sobre la portería de la calle 50 y la otra en las afueras del estadio respectivamente (figura 1).

Dentro del campus universitario se encuentra ubicada la estación climatológica principal, Universidad Nacional (2120622), operada por el IDEAM, a partir de la cual se ha determinado que la precipitación promedio multianual es de 810 mm, con un régimen de tipo bimodal y períodos máximos de precipitación durante los meses

de abril y mayo, y de octubre y noviembre (figura 3). Adicionalmente, en los alrededores del campus universitario, existen registros de precipitación de ocho estaciones meteorológicas operadas por la EAAB y el IDEAM. Infortunadamente, en estas ocho estaciones no se cuenta con registros simultáneos y concuer-

rantes a intervalos de tiempo suficientemente finos para permitir el análisis detallado de eventos de tormenta. Sin embargo, sí se encuentran disponibles las ecuaciones de las curvas i-d-f suministradas por la EAAB, las cuales, para la estación Universidad Nacional, se presentan en la figura 4.

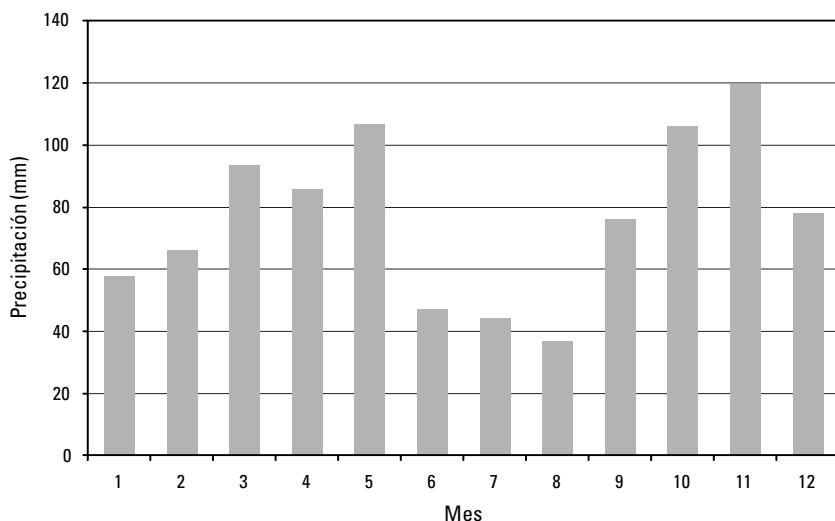


Figura 3. Histograma de precipitación mensual multianual, estación Universidad Nacional (2120622).

Fuente: obtenido a partir de registros del IDEAM para los años 1987-2004.

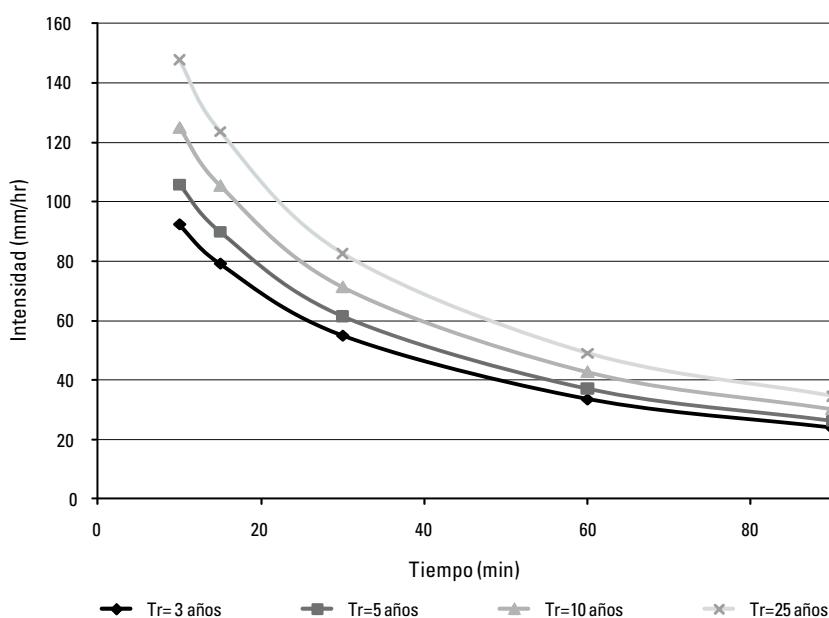


Figura 4. Curvas intensidad-duración-frecuencia para la estación Universidad Nacional (2120622).

Fuente: EAAB.

Con relación a la caracterización del patrón general de los vientos en la microcuenca, se cuenta con los datos de la estación meteorológica ubicada en el edificio de Física (figura 1) y operada por el mismo departamento, cuyos datos para los años 2006 y hasta agosto del 2007 han sido gentilmente suministrados para los propósitos de este estudio. A partir de estos se han elaborado las rosas de los vientos para el año 2006 (figura 5) y para el mes de abril del 2007 (figura 6), mes durante el cual se produjo el evento de tormenta analizado en detalle en este artículo. El análisis de las figuras 5 y 6 muestran claramente que los vientos, con velocidades promedio de 10 m/s, provienen de las direcciones SSE, S, SSW, y SW, lo que indica un desplazamiento preferencial de las masas de aire en estas direcciones, desde el suroccidente hacia los cerros nororientales que bordean la ciudad.

## Modelos y métodos

### Instrumentos

Con respecto a la configuración óptima de pluviógrafos en pequeñas cuencas (no necesariamente urbanas), varios investigadores han realizado diversas propuestas. Moore *et al.* (2000) desarrollaron una configuración óptima de ocho pluviógrafos en una cuenca de 2 km por 2 km. Krajewski *et al.* (2001) obtuvieron que, para la climatología de Oklahoma en los Estados Unidos, una red de 17 pluviógrafos permitiría realizar la estimación de la variabilidad espacial de la precipitación en una cuenca de 2 km por 2 km, con errores menores del 5%. Canfield *et al.* (2003) mostraron que el uso de un pluviógrafo y cuatro pluviómetros podría representar

con buena aproximación la variabilidad espacial de la precipitación en una cuenca rural de 4,5 ha ( $0,045 \text{ km}^2$ ). Paturel *et al.* (1986), a partir de simulaciones, recomiendan utilizar entre 4 y 5 pluviógrafos para un área de  $1,2 \text{ km}^2$ . La recomendación de Berne *et al.* (2004) indica que, para el campus, se necesitaría medir con una resolución de por lo menos 3 min ( $\Delta t$ ) y con una resolución espacial de  $2,6 \text{ km}$  ( $\Delta r = 1,5\sqrt{\Delta t}$ ; con  $\Delta t = 0,75A^{0.3} \text{ y } A \text{ en ha}$ ), lo que sugiere un pluviógrafo único. Schilling (1983) recomienda que el número de pluviógrafos por instalar sea determinado como la raíz cuadrada del área de la cuenca expresada en  $\text{km}^2$ , en cuyo caso para el campus universitario sería suficiente con un pluviógrafo. El Water Research Center (WRC) de Inglaterra recomienda la instalación mínima de 3 pluviógrafos para áreas de drenaje menores a  $8 \text{ km}^2$  y la medición a intervalos de 2 minutos, con el fin de obtener errores menores al 10% en la calibración de modelos lluvia escorrentía. El estudio de Uniandes (2001) en la cuenca del Virrey de  $0,8 \text{ ha}$ , en Bogotá, recomendó, a partir del análisis detallado de la información disponible de 47 tormentas registradas en 14 pluviógrafos de la ciudad de Bogotá (IRH 1995), la utilización de 2 pluviógrafos. Así, no existe consenso en cuanto al número de pluviógrafos por instalar y su distribución, pues claramente dependerá de las características de relieve, urbanización, microclima y vientos dominantes del área investigada, y ello da origen al análisis aquí reportado.

En concordancia con las recomendaciones más conservadoras de número mínimo de pluviógrafos reportadas en la literatura, se han instalado en 7 sitios, 14 pluviógrafos de

balancín del tipo Rain Collector II, fabricados por Davis Instruments, con área de captación de  $214 \text{ cm}^2$ , altura de 24 cm, resolución de  $0,2 \text{ mm}$  y precisión de  $\pm 4\%$  para intensidades menores de  $50 \text{ mm/hr}$  y de  $\pm 5\%$  para intensidades entre  $50$  y  $100 \text{ mm/hr}$ , con *data-logger* marca Hobo con sensor de temperatura. Se han utilizado conjuntos duales de pluviógrafos, cada uno de los cuales ha

sido ubicado en la cubierta de los edificios de Hemeroteca (PG1 y 2), Concha Acústica (PG3 y 4), Posgrados de Ciencias Humanas (PG5 y 6), Medicina (PG7 y 8), Capilla (PG9 y 10), Laboratorio de Hidráulica (PG11 y 12) e Instituto de Genética (PG13 y 14) (figura 1), lo que genera inicialmente una red aproximadamente uniforme de medición (que está siendo actualmente optimizada),

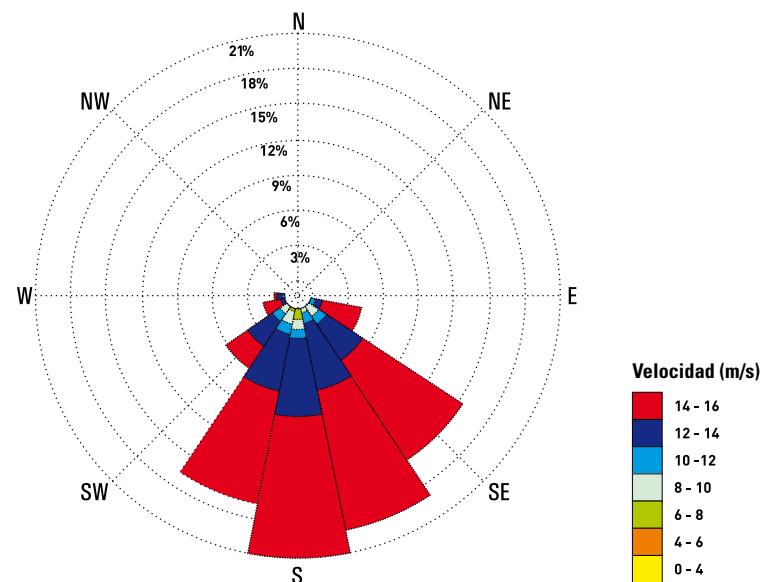


Figura 5. Rosa de los vientos para el año 2006.

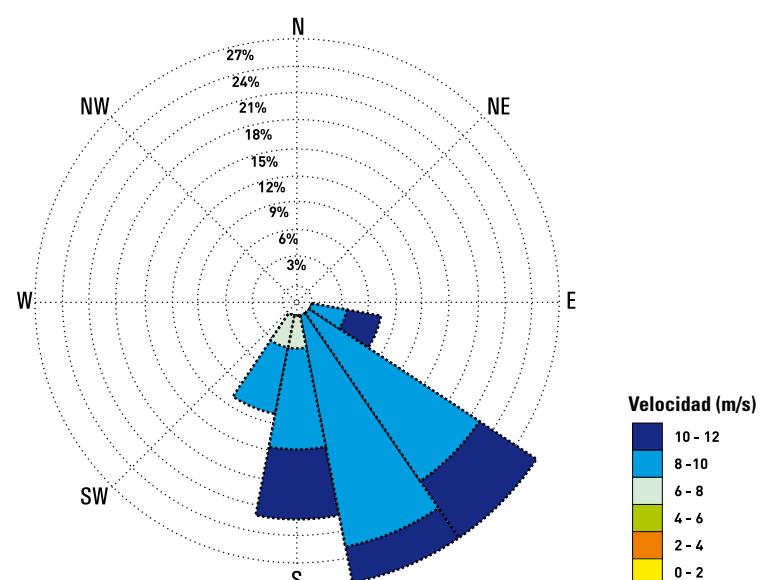


Figura 6. Rosa de los vientos para abril del 2007.

con distancias entre sitios vecinos que varían entre 400 m y 750 m (lo que indica una resolución espacial de medición promedio de 500 m) y alturas de instalación de los aparatos que varían entre 8 m y 17 m.

La utilización de una instalación de pluviógrafos dual, en lugar de una instalación sencilla, se justifica fundamentalmente por el incremento en la confiabilidad de los registros. Con frecuencia los pluviógrafos de balancín fallan porque el mecanismo de balancín se atasca; una instrumentación doble ha permitido reducir el riesgo de pérdida de información por mal funcionamiento de los equipos. Una instalación dual igualmente brinda mayor confiabilidad a los datos recopilados. Los datos de precipitación y temperatura, registrados en uno de los pluviógrafos y en el sensor de temperatura (PG11) ubicados en el Laboratorio de Hidráulica, se encuentran en línea, se actualizan cada 15 minutos y pueden ser consultados gráficamente en la página web: <http://www.ing.unal.edu.co/gireh/docs/datos.html>. Los datos de los restantes 13 pluviógrafos (únicamente registros de precipitación) se recogen semanalmente, descargando los datos del *data-logger* del equipo a un computador portátil, en actividades rutinarias en las cuales se realiza adicionalmente la inspección y el mantenimiento de los equipos. Una vez por mes se realizan actividades de calibración y sincronización de los aparatos, utilizando la instalación y la metodología que se describe en el siguiente numeral.

### Calibración de aparatos

Con el fin de asegurar la correcta calibración de los aparatos, así como de dar mayor confiabilidad



**FIGURA 7.** Instalación de calibración de pluviógrafos con suministro constante de caudal, a través de válvula de mariposa graduada.



**Figura 8.** Instalación de calibración de pluviógrafos con suministro constante de caudal, a través de equipo de venoclisis.

a los registros, y siguiendo las sugerencias de Vasvári (2005), se ha diseñado e implementado una estación de calibración de pluviógrafos en el Laboratorio de Hidráulica, utilizando un tanque de cabeza constante, con una pequeña bom-

ba sumergible y una válvula de mariposa con apertura graduada, con el fin de suministrar un caudal constante, aforado gravimétricamente y, por lo tanto, conocido, que simula la ocurrencia de una lluvia artificial de intensidad constan-

te dada. Por comparación entre los datos registrados en el *data-logger* y el valor de caudal constante suministrado, se establece el margen del error, que debiera ser inferior al 5% reportado por los fabricantes para las intensidades utilizadas. Sorprendentemente, para los aparatos nuevos, se encontraron errores: primero, de falta de sincronización entre los tiempos de volcado del balancín izquierdo y derecho de algunos pluviógrafos, y, segundo, errores en lámina acumulada que alcanzaron hasta el 35%. Para reducir el margen de error a valores cercanos al 5%, se utilizaron pipetas de precisión para llevar el volumen de volcado de cada balancín a valores cercanos a  $4,27 \text{ cm}^3$ , y se ajustaron simultáneamente los tornillos de cada uno de los balancines del pluviógrafo. La instalación anterior ha sido complementada con equipos de venoclisis para intensidades inferiores a  $25 \text{ mm/hr}$ . Las figuras 7 y 8 muestran el detalle de la instalación desarrollada.

### Criterio de selección de tormentas y aguacero seleccionado

Según las características de los aparatos de registro (resolución de  $0,2 \text{ mm}$  y error  $\pm 5\%$ ), se han seleccionado eventos de tormenta con profundidades mayores a  $4 \text{ mm}$  (para los cuales el error de un volteo del balancín es inferior al 5% de la profundidad medida). Bajo este criterio se registraron, en el año 2007, 33 eventos de tormenta, entre los cuales se ha seleccionado el evento del 5 de abril del 2007, por ser uno de los de mayor profundidad y con mayores intensidades en 15 minutos. Las características de todos los eventos registrados, incluyendo los histogramas de dura-

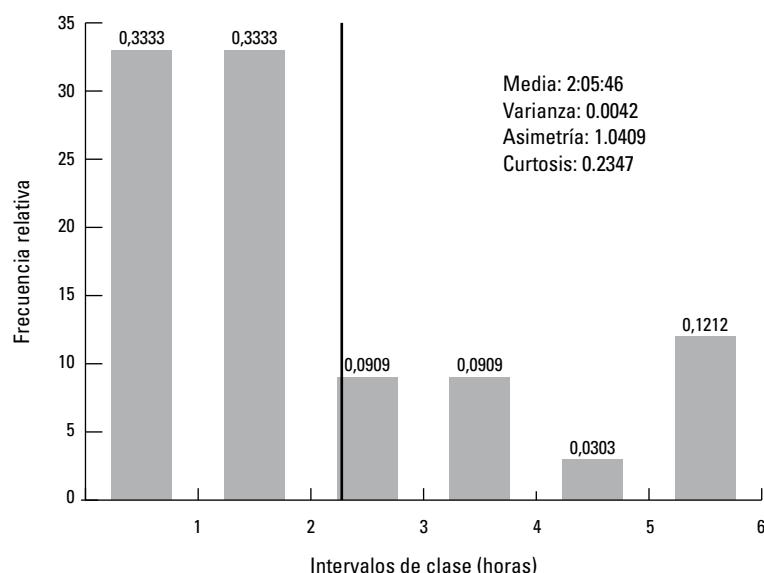


Figura 9. Histograma de frecuencias para duración de aguaceros registrados.

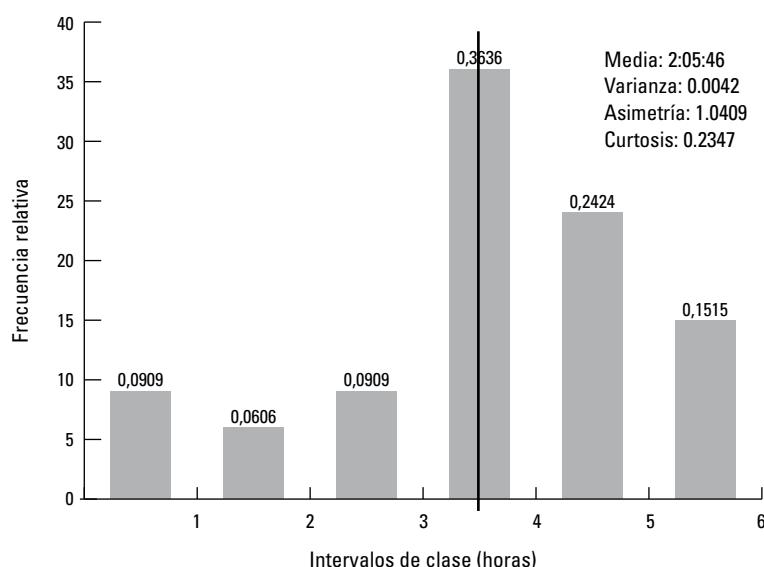


Figura 10. Histograma de frecuencias para la hora de inicio del aguacero. La línea negra indica los valores para el aguacero seleccionado.

ción del evento, hora de inicio y las curvas de masa adimensionales, se presentan en las figuras 9, 10, 11 y 12. Los resultados indican que, por lo general, las tormentas se presentan hacia el medio día (1:30 p. m.), con duraciones cortas (entre 1 y 2 hr), patrones típicos de tormentas de carácter convectivo y patrones erráticos, que de algún modo sugieren posibles dificultades en la in-

terpolación del campo de precipitación. Igualmente, en las figuras 9 y 10, se indican las características del aguacero seleccionado, que, aunque tiene una duración ligeramente superior al promedio de las tormentas registradas en el 2007, produjo la mayor cantidad de precipitación registrada sobre el campus (21,6 mm registrados en uno de los pluviógrafos de Medicina —PG7—).

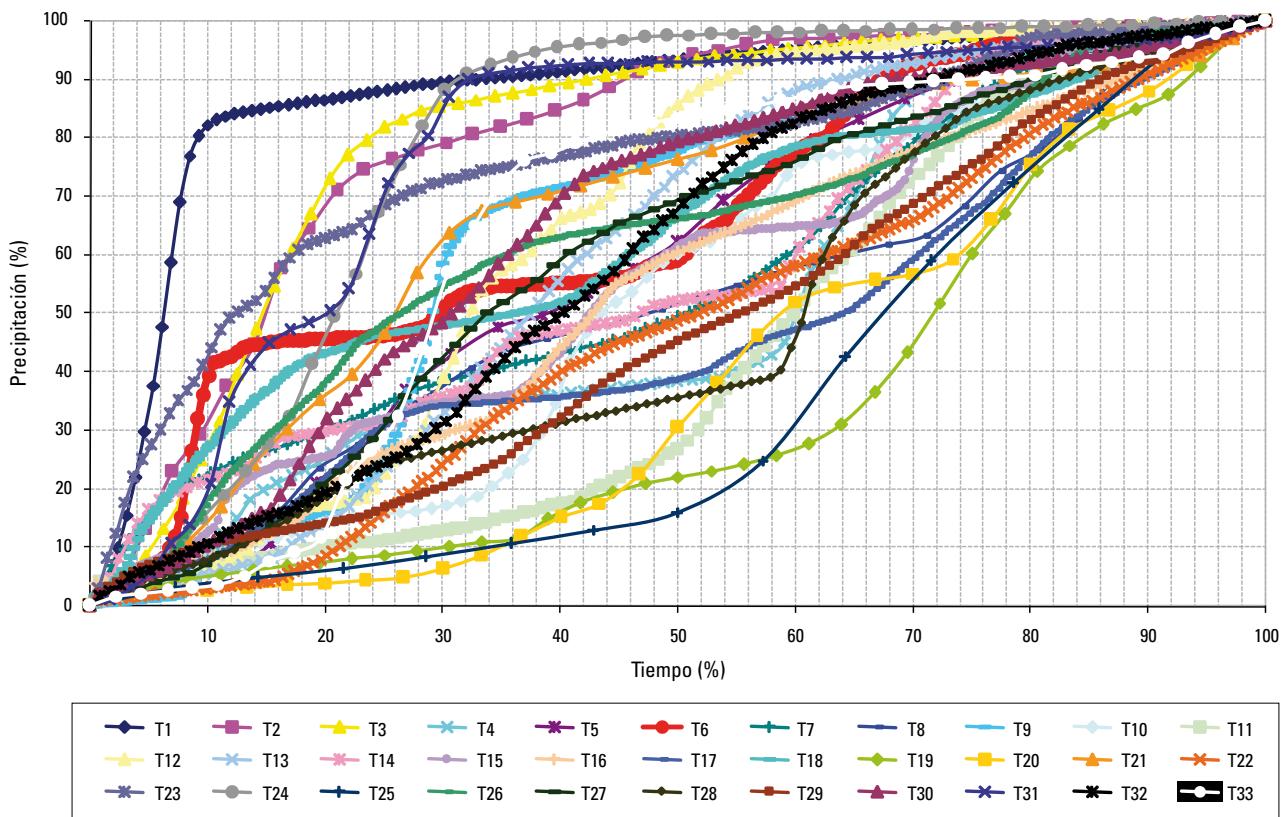


Figura 11. Curvas de masa adimensionales para aguaceros registrados.

Adicionalmente, en la figura 12, se presenta el hietograma del aguacero seleccionado, registrado en el mismo pluviógrafo, a intervalos de 15 minutos, acordes con el tiempo de retardo de la microcuenca. Debe mencionarse que para el evento de tormenta seleccionado la intensidad máxima registrada en este pluviógrafo, para 15 minutos, es de aproximadamente 30 mm/hr, valor que comparado con los datos de la curva i-d-f, presentada en la figura 4, correspondería a un período de retorno por debajo de tres años, lo que indica que durante la primera temporada lluviosa del 2007, en la que estuvieron en operación los equipos, no se presentaron eventos extremos. Sin embargo, en noviembre del 2007, se presentó una granizada muy importante sobre Bogotá, registrada en el campus universita-

rio, cuyo análisis detallado es reportado por Rodríguez *et al.* (2008).

### Interpolación espacial y temporal de la precipitación

La calidad de los resultados de la interpolación espacial y temporal del campo de precipitación depende fundamentalmente de la calidad de los datos, del número y distribución de los pluviógrafos utilizados y de qué tan bien la función matemática seleccionada representa el fenómeno. En cuanto a los aspectos de calidad de los datos y configuración de la red, estos han sido discutidos en los dos numerales previos. Por tanto, el objetivo de este numeral es presentar los relacionados con el método de interpolación. Al respecto, diferentes métodos han sido propuestos en la literatura para

la estimación de la precipitación areal, desde el método simple y popular del inverso de la distancia, pasando por métodos determinísticos como interpolaciones polinomiales, hasta técnicas más complejas, basadas en interpolación estadística, como el caso de *kriging* (Meijerink *et al.* 1994). Aunque se tiende a pensar que el método más complejo brinda los mejores resultados, esto no es necesariamente cierto, pues depende, como se mencionó anteriormente, de factores externos al método de interpolación. Sin embargo, según Creutin y Obled (1982), para el caso de áreas con eventos de precipitación con fuerte variación, como el caso del área de estudio, las técnicas más sofisticadas, por lo general, brindan mejores resultados que las técnicas más simples.

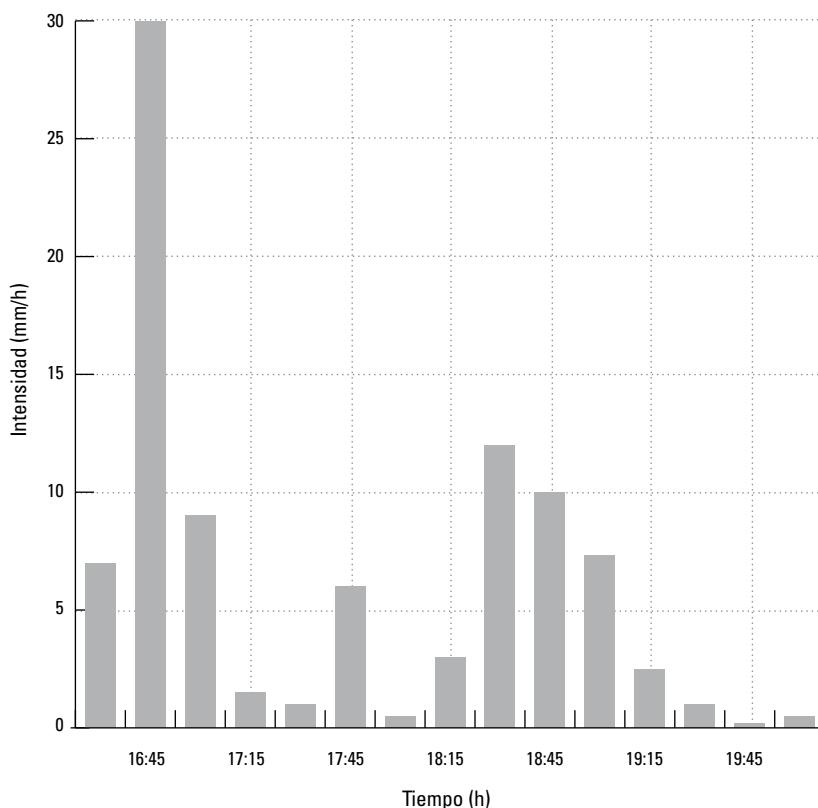


Figura 12. Histograma de tormenta para el aguacero seleccionado del 5 de abril del 2007, a intervalos de 15 minutos en el PG7 de Medicina.

Con el fin de evaluar la variabilidad espacial de las profundidades totales e intensidades máximas en 15 minutos, registradas en los siete sitios, y analizar la variabilidad temporal de la tormenta seleccionada sobre el campus, a intervalos de 15 minutos, para el evento escogido, se han seleccionado tres métodos que representan diferentes niveles de complejidad y que corresponden al método del inverso de la distancia, interpolación polinomial y a la interpolación mediante *kriging*, disponibles todos en la extensión de análisis geoespacial de ArcGIS. Los tres métodos se encuentran detalladamente descritos en Meijerink *et al.* (1994) y aquí únicamente se presenta un breve resumen de estos.

El método del inverso de la distancia es bastante simple, sencillo

y de común aplicación en hidrología y meteorología. Está basado en la asignación del valor interpolado con base en los valores de un número fijo de estaciones vecinas y en un factor de peso calculado como el inverso de la distancia al cuadrado. El método de interpolación polinomial intenta ajustar un polinomio bivariado de grado  $i$  como superficie de interpolación. De otra parte, *kriging* corresponde a un método de interpolación de tipo estocástico que permite realizar la estimación del error y la validación de los resultados obtenidos, a través de validación cruzada (removiendo uno a uno cada uno de los registros y recalculando el semivariograma). Requiere, sin embargo, especificar tendencias y parámetros en el modelo, que pueden ser analizados a través del semivariograma.

La aplicación de *kriging* requiere que el proceso sea de tipo estacionario, y algunos tipos de *kriging* requieren que los datos provengan de una distribución normal, restricciones que no se aplican para el caso de los otros dos métodos de interpolación.

## Análisis de resultados

A partir de los datos registrados para el aguacero seleccionado, los cuales, según los análisis del histograma y del diagrama Q-Q, provienen de una distribución normal, es posible realizar dos tipos de comparaciones: la primera, a nivel puntual, entre los dos registros de un mismo sitio y, la segunda, a nivel espacial, con los registros entre estaciones. La figura 13 muestra la comparación de los registros de los dos pluviógrafos ubicados en el edificio de Medicina, en la cual es evidente que las dos curvas de masa son casi idénticas. Considerando que gráficas similares fueron obtenidas en los otros puntos de medición (nótese que los PG2 y PG6 no tienen registros para el evento, por encontrarse en proceso de recalibración), es posible afirmar que los datos del evento de tormenta seleccionado son de excelente calidad, lo que brinda mayor confiabilidad a los resultados aquí presentados.

La figura 14 muestra las curvas de masa adimensionales para el evento de tormenta seleccionado, correspondientes a los registros de los pluviógrafos con numeración impar localizados en cada uno de los diferentes siete sitios de medición. La importante variabilidad del evento analizado, mostrada en la figura 14 (coeficiente de variación del 11%), indica que la forma general de las curvas de masa es casi aleatoria,

las intensidades pico (pendientes máximas de las curvas de masa) ocurren a diferentes tiempos y, adicionalmente, en los hietogramas (no presentados aquí) es claro que los tiempos de inicio y finalización del evento son diferentes. Debe anotarse adicionalmente que todos los aparatos están sincronizados con la hora estándar de Colombia, que pueden tener errores de hasta 1 minuto en dos meses y que son resincronizados cada mes.

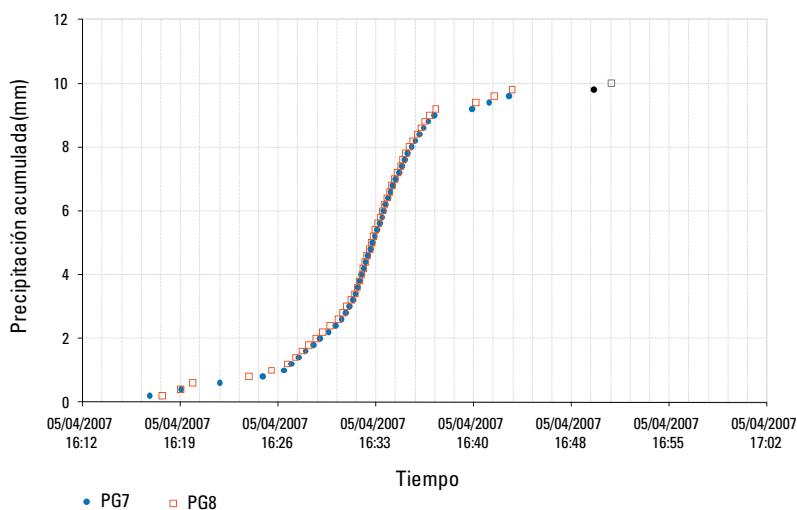


Figura 13. Curvas de masa para los dos pluviógrafos ubicados en Medicina (PG7 y PG8) para el evento de tormenta seleccionado.

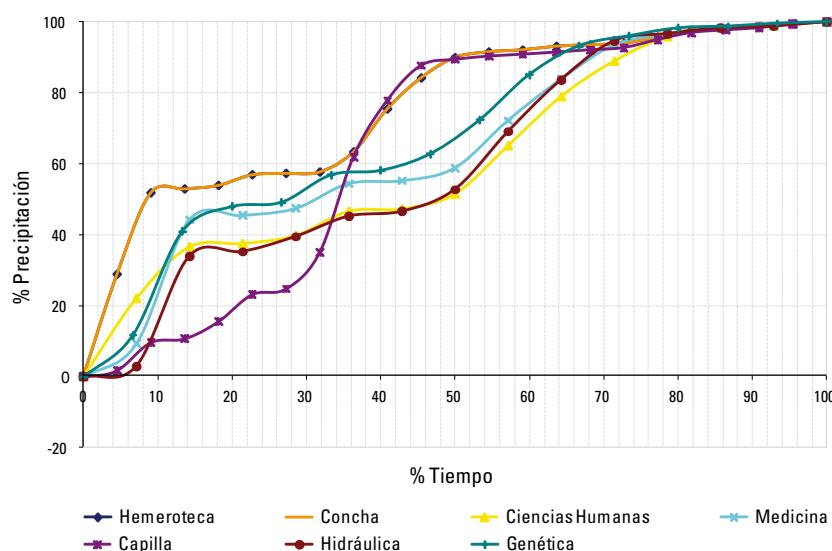


Figura 14. Curvas de masa adimensionales para el evento de tormenta seleccionado.

En la figura 14 es evidente la enorme variabilidad espacial temporal del campo de precipitación para el evento seleccionado. Los registros de la Hemeroteca y la Concha Acústica indican que el evento produjo más de la mitad de la precipitación en la parte inicial de la tormenta, mientras que los datos de la Capilla sugieren que el aguacero fue mucho más intenso hacia la mitad de esta. Lo anterior es indicación de un posible movimiento

de la tormenta desde el suroccidente hacia el nororiente, consecuente con el patrón de dirección predominante de los vientos descrito anteriormente.

Las figuras 15 y 16 muestran los mapas de distribución espacial del aguacero, para valores totales de precipitación caída, obtenidos mediante los métodos de *kriging* e inverso de la distancia, y la tabla 1 muestra los valores de profundidad total e intensidad máxima en 15 minutos para el evento seleccionado.

Es evidente en los mapas de la figura 8 la importante variabilidad espacial del campo de precipitación para la tormenta analizada. Para la resolución promedio de la red instalada (aproximadamente 500 m), la precipitación total puede variar en más del 15% y las intensidades máximas en 15 minutos hasta en un 75% (figura 17), lo que indica la magnitud de esta variabilidad, aún para un aguacero no tan intenso.

Los resultados mostrados en las figuras 15 y 16 y en la tabla 2 sugieren que, mediante la aplicación de los tres métodos de interpolación analizados, se obtienen resultados bastante semejantes (errores promedio y desviaciones estándar similares) y que la complejidad del método de *kriging* no necesariamente reduce las desviaciones del error. Sin embargo, y teniendo en cuenta que entre más cerca se encuentre el  $R^2$  estandarizado a 1,0, mejor es la interpolación realizada, podría concluirse que el método de *kriging*, para el caso estudiado, es ligeramente superior a los otros dos métodos analizados. Por eso, es utilizado en los análisis subsiguientes. Adicionalmente, los métodos del inverso de la distancia e interpolación polinomial presentan problemas de creación de "ojos" de tormenta (figura 16).

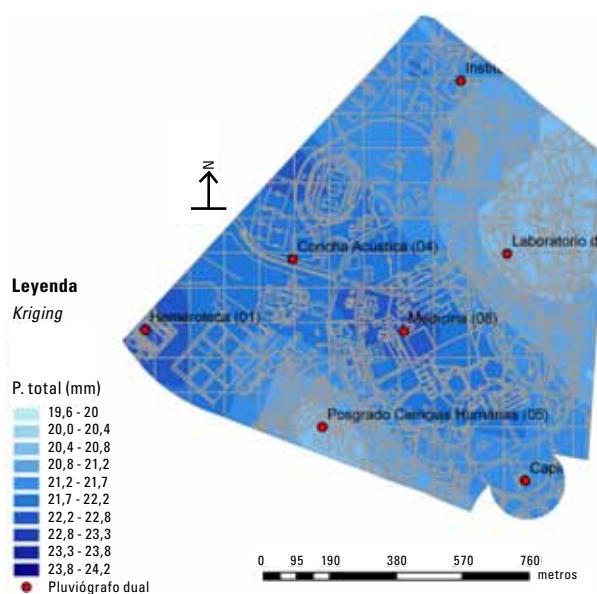


Figura 15. Precipitación total espacializada utilizando kriging.

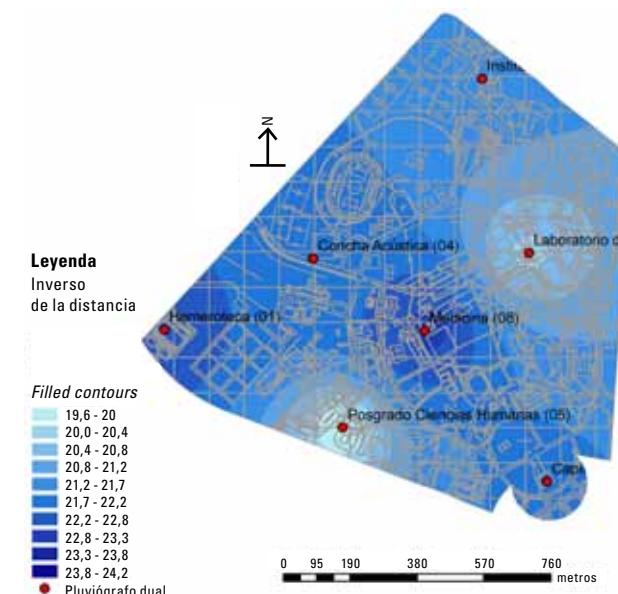


Figura 16. Precipitación total espacializada utilizando inverso de la distancia.

**TABLA 1.** Valores totales de precipitación e intensidad máxima en 15 minutos del aguacero seleccionado en los diferentes pluviógrafos.

N.º Pluviógrafo	Prof. Total (mm)	Int. máx. 15 mín. (mm/hr)	Factor importancia Thiessen %	N.º de pluviógrafo	Prof. Total (mm)	Int. máx. 15 mín. (mm/hr)	Factor importancia Thiessen %
1 (Hemeroteca)	22,8	26,1	7,3	8	22,2	30,1	
2	-	-		9 (Capilla)	22,4	24,0	
3 (Concha)	22,6	26,1	18,1	10	22,2	22,8	10,9
4	21,8	27,0		11 (Hidráulica)	20,4	25,1	
5 (Ciencias Humanas)	19,6	17,2	11,5	12	20,2	26,9	21,9
6	-	-		13 (Genética)	21,8	25,4	
7 (Medicina)	21,6	29,9	14,1	14	21,0	23,5	16,2

**TABLA 2.** Resultados de la validación para la interpolación por diferentes métodos de los valores de precipitación total para el aguacero seleccionado.

Método	Error promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	R <sup>2</sup> estandarizado
Inverso de la distancia	0,132	1,57	1,511
Interpolación global polinomial	-0,180	1,48	1,422
Kriging ordinario con tendencia	0,166	1,55	1,199

En la figura 17 se presentan los resultados de la espacialización, mediante *kriging* de intensidades máximas registradas en 15 minutos. Esta muestra claramente la tendencia en dirección NW ocasionada por

el movimiento preferencial de las masas de aire sobre el campus en esta dirección.

La figura 18 (a y b) muestra la variabilidad temporal del evento, resultado de la interpolación, me-

diante *kriging*, de las intensidades a intervalos de 15 minutos para las primeras tres horas del aguacero. Para los intervalos analizados, el coeficiente de variación está en el rango entre 12% (intervalo 11) y 187%

(intervalo 4). Claramente los resultados muestran una importante variabilidad temporal, típica de tormentas de tipo convectivo, y muestra un movimiento de la celda de precipitación aproximadamente en el sentido de las manecillas del reloj.

## Conclusiones

Se ha mostrado que el evento de tormenta, ocurrido sobre el campus el 5 de abril del 2007, es dinámico a medida que pasa sobre el área de estudio, presenta intensidades que varían significativamente en tiempo y espacio con coeficientes de variación del 11% para la precipitación total y de hasta 187% para las intensidades máximas en 15 minutos. Por ende, cualquier modelo hidrológico que descarte este comportamiento introduce un error importante en la simulación. Adicionalmente, la variabilidad espacio-temporal de la precipitación mostrada hace complicada la calibración de este tipo de modelos, aspecto que ha sido reportado por Rodríguez *et al.* (2008).

La aplicación de tres diferentes métodos de interpolación con variados niveles de complejidad (inverso de la distancia, interpolación polinomial y *kriging*) ha permitido concluir que, para el evento analizado, las mejoras en la interpolación por efecto de incrementos en la complejidad del método utilizado no son significativas para el caso estudiado, y que un método como el inverso de la distancia proporciona resultados que, haciendo aparte los problemas de ojos de tormenta, se comparan razonablemente bien con un método mucho más complejo como el de *kriging*.

Debe resaltarse que los resultados obtenidos y aquí reportados

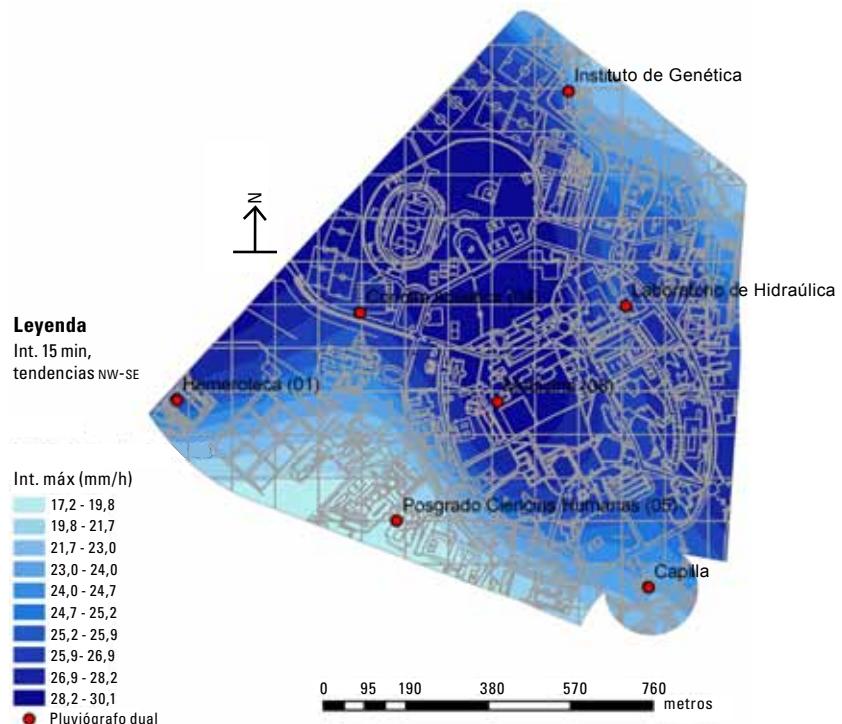


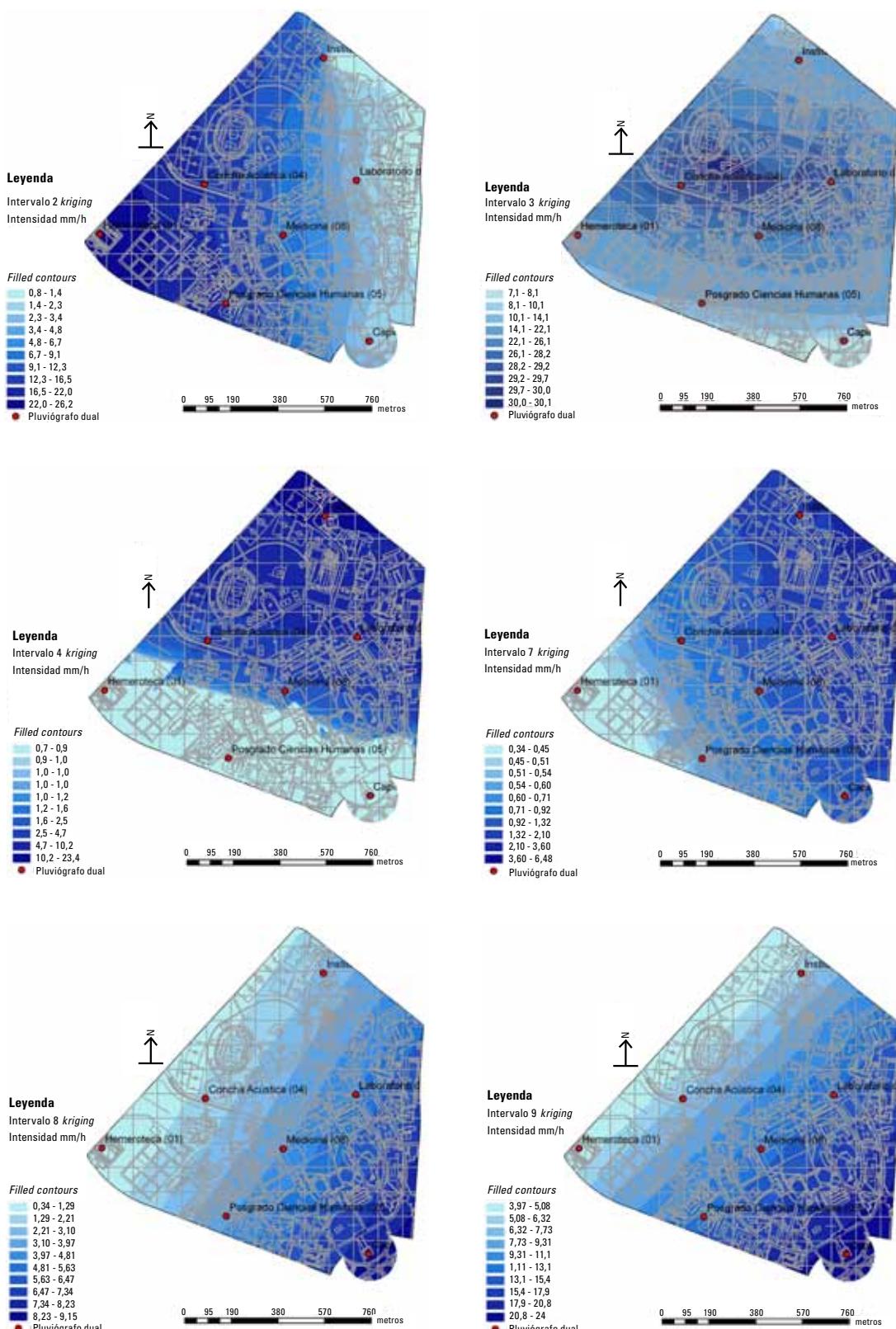
Figura 17. Interpolación mediante *kriging* de las intensidades máximas en 15 minutos registradas para el aguacero seleccionado.

se consideran iniciales, pues están limitados al análisis de un solo evento de precipitación y a una sola cuenca con un área de 1,2 km<sup>2</sup>.

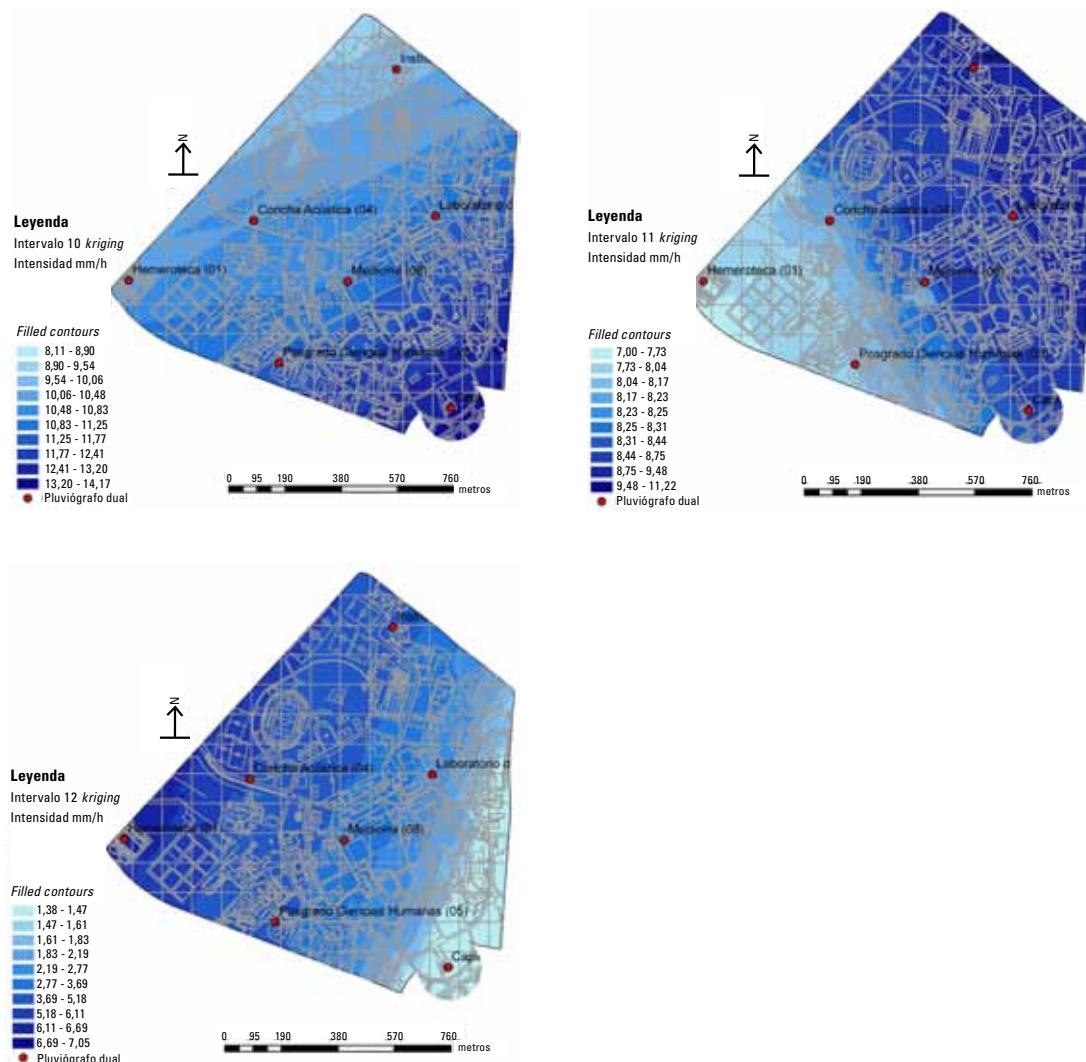
Los resultados iniciales incluidos en este artículo muestran que las aplicaciones de hidrología urbana en pequeñas microcuencas requieren resoluciones espaciales y temporales para la precipitación que las redes de medición del IDEAM y de la EAAB, para el caso de Bogotá, no tienen. En este sentido, es evidente la necesidad de densificar este tipo de redes a nivel urbano, para propósitos no solo de mejoramiento de los diseños, sino para la planificación y manejo en tiempo casi-real del sistema de drenaje. Sin embargo, este tipo de redes son costosas de mantener y, en este sentido, se resalta la importancia de complementar las redes existentes en la ciudad con un sistema de radar para la medición de la precipitación.

## Agradecimientos

El autor agradece a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, por la financiación otorgada para la ejecución de este proyecto. Igualmente, agradece al Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar del Departamento de Física de la misma universidad, por suministrar los datos de temperatura y velocidad del viento de la estación ubicada en el edificio de Física, y al IDEAM, por suministrar los datos mensuales de precipitación de la estación Universidad Nacional. Finalmente, pero no menos importante, está el reconocimiento al apoyo de varios estudiantes del pregrado en Ingeniería Civil, quienes de forma desinteresada han contribuido generosamente al desarrollo del proyecto.



**Figura 18a.** Secuencia de interpolación con kriging de intensidades a intervalos de 15 minutos para los intervalos 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 del aguacero seleccionado.



**Figura 18b.** Secuencia de interpolación con *kriging* de intensidades a intervalos de 15 minutos para los intervalos 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 del aguacero seleccionado.

#### Erasmo Rodríguez Sandoval

Es Ingeniero Civil de la Universidad de los Andes, hizo estudios de Especialización y Maestría en Recursos Hidráulicos en el ITC, Holanda (1992-1994), de Especialización en Manejo Integrado del Medio Ambiente, Universidad de los Andes (1996). Es Ph.D. en Ingeniería Civil de la University of Waterloo, Canadá (2005). Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH).

#### Luis A. Camacho B.

Profesor Asociado. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Integrante del Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH). Contacto: lacamachob@unal.edu.co

#### Jacobo Villarreal P., Alejandro Jiménez,

#### Ana Carolina Santos R. y María del Pilar Duarte B.

Ingenieros civiles. Estudiantes del programa de Maestría en Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Integrantes del Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH).

## Referencias

- Bergstrom, S. y L. P. Graham. 1998. On the Scale Problem in Hydrological Modeling. *Journal of Hydrology* 211: 253-265.
- Berne, A., G. Delrieu, J. Creutin y C. Obled. 2004. Temporal and Spatial Resolution of Rainfall Measurements Required for Urban Hydrology. *Journal of Hydrology* 299: 166-179.
- Beven, K. 2001. *Rainfall and Runoff Modeling: the Primer*. Chichester: Wiley.
- Butyaert, W., R. Celleri, P. Willems, B. De Bievre y G Wyseure. 2006. Spatial and Temporal Rainfall Variability in Mountainous Areas: a Case Study from the South Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* 329: 413-421.
- Canfield H. y D. Goodrich. 2003. *Studies of Scale and Processes in Hydrologic Modeling on the Lucky Hills Watershed*. Presentado en Proc. 1<sup>st</sup> Interagency Conf. on Research in the Watersheds. 27-30 de octubre, Benson, Arizona.
- Creutin, J. D. y C. Obled. 1982. Objective Analysis and Mapping Techniques for Rainfall Fields; an Objective Comparison. *Water Resources Research* 18 (2): 413-431.
- Dubayah, R., E. F. Wood y D. Lavallé. 1996. Multiscaling Analysis in Distributed Modeling and Remote Sensing: an Application Using Soil Moisture. En *Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS*. Ed. Michael Goodchild y D. Quattrochi, 93-111. Boca Ratón: CRC Lewis.
- Ingiería de Recursos Hídricos Ltda. (IRH). 1995. Análisis y caracterización de tormentas en la Sabana de Bogotá: informe final. Bogotá D. C.
- Kite, G. W. y U. Haberlandt. 1999. Atmospheric Model Data for Macroscale Hydrology. *Journal of Hydrology* 217: 303-313.
- Krajewski, W. F., A. Kruger y V Nespor. 2001. Experimental and Numerical Studies of Small-Scale Rainfall Measurements and Variability. *Water Science and Technology* 37 (11): 131-138.
- Meijerink, A., H. de Brouwer, C. Mannaerts y C. Valenzuela. 1994. *Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology*. Publicación n.<sup>o</sup> 23. Enschede: Unesco-ITC.
- Moore, R. J., D. A. Jones, D. R. Cox y V. S. Isham. 2000. Design of the Hyrex Raingauge Network. *Hydrology and Earth System Sciences* 4: 523-530.
- Mulvaney, T. J. 1850. On the Use of Self-Registering Rain and Flood Gauges in Making Observations on the Relation of Rainfall and Flood Discharges in a Given Catchment. *Transactions of Institution of Civil Engineers Ireland* 4: 18-31.
- Paturel, E., M. Desbodes y J. M. Masson. 1986. Evaluation de l'influence de la densité des réseaux pluviométriques sur la determination des lames précipitées. Informe LHM 14-86. París.
- Rodríguez, E., L. Camacho, W. Jiménez, M. Duarte y J. Villareal. 2008. Análisis hidrometeorológico de granizada sobre el campus de la Universidad Nacional, sede Bogotá. Presentado en el Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Memorias de XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Rodríguez, E., L. Camacho, W. Jiménez, M. Duarte y J. Villareal. 2008. Instrumentación y modelación hidrometeorológica y ambiental de una cuenca urbana: caso de estudio campus universidad nacional. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena.
- Segond, M. L., C. Onof y H. S. Wheater. 2006. Spatial-Temporal Disaggregation of Daily Rainfall from a Generalized Linear Model. *Journal of Hydrology* 331: 674-689.
- Sevruk, B. y V. Nespor. 1998. Empirical and Theoretical Assessment of the Wind Induced Error of Rain Measurement. *Wat. Sci. Tech* 37 (11): 171-178.
- Shilling, W. 1996. *On the Relation between Urban Wastewater Management Needs and Receiving Water Objectives*. Trondheim: European Project Cost 682 ("Integrated Wastewater Management").
- Uniandes - EAAB. 2001. Informe final del proyecto "Instrumentación y análisis ambiental de una subcuenca del sistema de alcantarillado de Bogotá". Bogotá: Uniandes.
- Vaes, G., P. Willems y J. Berlamont. 2005. Areal Rainfall Correction Coefficients for Small Urban Catchments. *Atmospheric Research* 77: 48-59.
- Vasvári, V. 2005. Calibration of Tipping Bucket Rain Gauges in the Graz Urban Research Area. *Atmospheric Research* 77: 18-28.
- Wood, E. F. 1998. Scale Analysis for Land Surface Hydrology. *En Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*. Ed. G. Sposito, 1-29. Cambridge: University Cambridge Press.