

# Análisis de la variabilidad de la magnitud e intensidad de la lluvia sobre la ciudad de Manizales

Ana Cristina Cortés C., Blanca Adriana Botero H., Cesar Franco R.

## RESUMEN

El presente trabajo es la fase inicial del proceso de investigación de tesis de maestría, que se está adelantando actualmente con respecto al análisis de la variabilidad espacio-temporal de los campos de precipitación sobre la ciudad de Manizales, en cuanto a magnitud e intensidad. En este artículo se presentan: 1. El análisis mediante validación cruzada, de tres de las técnicas de interpolación espacial más utilizadas, que permite identificar el método más apropiado para la zona de estudio y 2. El análisis inicial de la variación de los campos interpolados de precipitación, mediante la producción de los mapas de varianza, identificando las zonas donde se presenta mayor dispersión de la precipitación en términos de intensidad y magnitud sobre la ciudad de Manizales.

**Palabras Clave**—Precipitación, interpolación espacial, validación cruzada, variabilidad espacio-temporal.

## I. INTRODUCCIÓN

Manizales, ciudad de media montaña andina, posee características particulares de vulnerabilidad con respecto a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos de gran magnitud. Este ha sido el contexto propicio para el desarrollo de una red de monitoreo climático. Manizales posee una red meteorológica moderna conformada por 11 estaciones, las cuales se han venido instalando a lo largo de más de diez años de funcionamiento. Esta red ha sido desarrollada en un esfuerzo conjunto de la Universidad Nacional de Colombia, su instituto de estudios ambientales IDEA, y la Alcaldía de Manizales a través de la Oficina para la prevención y atención de desastres, OMPAD. La información es recolectada cada cinco minutos sobre ocho variables: Temperatura, Precipitación, Radiación Solar, Humedad Relativa, Velocidad y Dirección del Viento, Presión Barométrica y Evapotranspiración [1].

Es a partir de los registros históricos disponibles y una densidad de estaciones que se aproxima a la adecuada que se haya pertinente el desarrollo de este trabajo. Según la referencias [2] y [3], para el área de Manizales (60,94 km<sup>2</sup>) el número de pluviógrafos en función del área de la cuenca debería ser de 17, sin embargo la densidad con la que se cuenta actualmente, de 11 estaciones, resulta ser la red urbana más densa del país [4]. El análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación es un tema que apenas comienza a desarrollarse con los datos que se tienen para Manizales. Recientemente un estudio de contaminación del aire y lluvia ácida sobre Manizales [5] obtuvo campos de precipitación, sin embargo el objeto de este estudio no era analizar la variabilidad de dichos campos.

Se escoge para este estudio el año 2008, el cuál fue un año especialmente húmedo: El mes de mayo de 2008 fue el mayo más lluvioso de todos los años de los que se tiene registro en Manizales (52 años, estación Agronomía), con 360 mm de lluvia frente a una media histórica de 185 mm (la mitad aproximadamente); El mes de octubre de 2008 fue el octubre más lluvioso de los últimos 40 años (estación Agronomía) [4]. El 14 de noviembre de 2008 se presentó un evento en el cuál según registros del IDEA, a lo largo de 3 días cayeron en promedio 200 milímetros de agua, lo que equivale a un mes de lluvia en temporada invernal en la ciudad [6]. En esta ocasión a la ocurrencia de deslizamientos de laderas se sumó el flujo de lodos en los cauces y producto de esto, la ciudad en distintos puntos sufrió fuertes impactos sobre el contexto físico - espacial: insuficiencia y falla en las obras de infraestructura hidráulica, afectaciones sobre urbanizaciones por su cercanía a los cauces, obstrucción y daños en la bocatoma del acueducto, entre otras.

El presente estudio inicia con el análisis de tres de los métodos de interpolación espacial más utilizados en la hidrología: Kriging Ordinario, Inverso de la distancia (IDW) y Curvatura mínima (Spline). Mediante la técnica de validación cruzada se establece el error cometido con cada uno de los métodos y se identifica aquel que presente menor error.

Una vez establecido el método más adecuado para la interpolación espacial de la lluvia sobre la ciudad de

Primer Autor: [accortesc@unal.edu.co](mailto:accortesc@unal.edu.co), estudiante de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

Segundo Autor: [babotero@unal.edu.co](mailto:babotero@unal.edu.co), Docente Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

Tercer Autor: [cfrancora@unal.edu.co](mailto:cfrancora@unal.edu.co), estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Manizales con las estaciones disponibles, se hace por éste método un análisis inicial de la variación de los campos de precipitación a través de mapas de varianza. Esta interpolación se hace para 21 eventos identificados como máximos durante el año 2008, en función de la intensidad máxima y de la magnitud.

## II. METODOLOGÍA

Con la información de precipitación disponible, se seleccionaron los 21 eventos con la mayor intensidad máxima para el año 2008.

Con los eventos ya definidos se realizó la interpolación espacial de los datos. Se utilizaron los métodos de interpolación disponibles en ArcGIS: Kriging Ordinario, Inverso de la distancia (IDW) y Curvatura mínima (Spline). Después mediante la técnica de validación cruzada se halló el error cometido con cada uno de los métodos calculando el error medio cuadrático (1):

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (x_{simulado} - x_{real})^2 \right]} \quad (1)$$

Sobre los métodos de interpolación se puede encontrar bastante información en la literatura. Para profundizar en este tema se recomienda ver las referencias [7] y [8].

Se establecieron los parámetros para cada uno de los métodos de interpolación, como se indica a continuación:

Para el Kriging ordinario se calculó el semivariograma para uno de los eventos, a través del uso del programa variowin [9]. Mediante el ajuste de un modelo al semivariograma se encontró que el modelo que mejor ajuste presentó fue el Gaussiano, con los parámetros: Tamaño del intervalo espacial=360, Alcance=7294,986, Meseta=160 y Efecto pepita=40.

Para el Inverso de la distancia (IDW), se definió el parámetro Potencia=2, por ser de interés para el estudio la aplicación de este método de interpolación al cuadrado, y un radio de búsqueda variable por tener puntos de muestra escasos y ubicados aleatoriamente [10].

Para la Curvatura mínima, se definieron como parámetros: Tipo de curvatura=tensión, Peso=10, de acuerdo a los valores recomendados en la literatura [10].

## III. RESULTADOS ENCONTRADOS

A partir de los 21 eventos ocurridos durante el año 2008 y medidos en las 11 estaciones meteorológicas, se obtuvieron 231 datos en los que se interpolaron las variables magnitud e intensidad máxima (Tabla 1).

Tabla 1. Eventos considerados año 2008. Cuadro Resumen.

| Evento                | Magnitud (mm) |            | Intensidad Máxima (mm/hr) |                    |
|-----------------------|---------------|------------|---------------------------|--------------------|
|                       | Valor Real    | Estación   | Valor Real                | Estación           |
| <b>E01 (02010130)</b> | 31.24         | Posgrados  | 88.44                     | Posgrados          |
| <b>E02 (02280055)</b> | 40.14         | El Carmen  | 85.32                     | El Carmen          |
| <b>E03 (02280115)</b> | 39.63         | El Carmen  | 85.44                     | Ingeominas         |
| <b>E04 (03041340)</b> | 27.94         | El Carmen  | 82.20                     | El Carmen          |
| <b>E05 (03111640)</b> | 32.60         | La Palma   | 91.20                     | La Palma           |
| <b>E06 (03111910)</b> | 29.21         | Ingeominas | 88.44                     | Ingeominas         |
| <b>E07 (03301355)</b> | 34.04         | Yarumos    | 131.04                    | Yarumos            |
| <b>E08 (03301405)</b> | 30.23         | El Carmen  | 100.56                    | El Carmen          |
| <b>E09 (04070015)</b> | 37.60         | Ingeominas | 82.44                     | Ingeominas         |
| <b>E10 (04111735)</b> | 38.35         | El Carmen  | 100.68                    | Ingeominas         |
| <b>E11 (04121630)</b> | 33.40         | Emas       | 93.60                     | Emas               |
| <b>E12 (04211610)</b> | 29.20         | Emas       | 115.20                    | Hospital de Caldas |
| <b>E13 (04251825)</b> | 15.40         | La Palma   | 103.20                    | La Palma           |
| <b>E14 (08020105)</b> | 51.31         | El Carmen  | 85.32                     | Ingeominas         |
| <b>E15 (09141620)</b> | 15.00         | Emas       | 103.20                    | Emas               |
| <b>E16 (10091945)</b> | 68.07         | Ingeominas | 82.32                     | Ingeominas         |
| <b>E17 (11141605)</b> | 37.80         | Aranjuez   | 81.60                     | Aranjuez           |
| <b>E18 (11151535)</b> | 42.42         | Ingeominas | 97.56                     | Ingeominas         |
| <b>E19 (11180840)</b> | 52.33         | El Carmen  | 85.44                     | El Carmen          |
| <b>E20 (11301600)</b> | 17.27         | El Carmen  | 108.00                    | Hospital de Caldas |
| <b>E21 (11302240)</b> | 50.55         | El Carmen  | 82.32                     | El Carmen          |

La interpolación se realizó retirando una estación a la vez, procedimiento que se repetía en cada evento, y haciendo la lectura del valor interpolado sobre el sitio de la estación retirada, de manera que se obtuviera el valor simulado (interpolado) y se confrontara con el valor real (registrado).

Con los resultados de las interpolaciones se calculó el error medio cuadrático, obteniéndose los siguientes resultados:

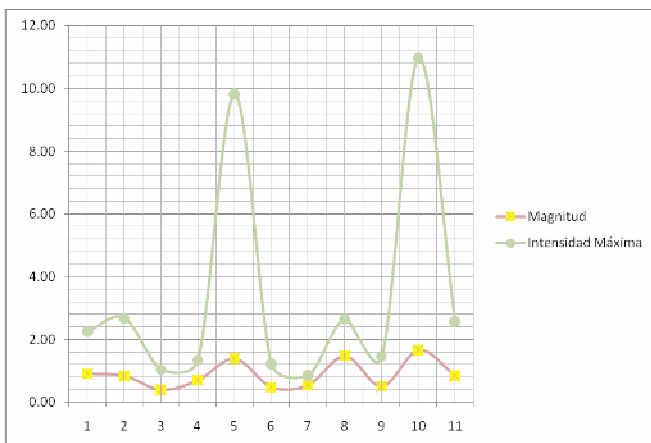
Tabla 2. Error entre métodos de interpolación.

| Método de interpolación  | Magnitud (mm) | Intensidad Máxima (mm/hr) |
|--------------------------|---------------|---------------------------|
|                          | EMC           | EMC                       |
| <b>Kriging Ordinario</b> | 9.38          | 30.85                     |
| <b>IDW</b>               | 11.79         | 31.81                     |
| <b>Spline</b>            | 9.57          | 34.80                     |

De la tabla 2, se observa que el método que menor error presenta es el Kriging ordinario, sin embargo la diferencia entre los errores obtenidos por los tres métodos es muy baja.

Para el estudio se seguirá trabajando con el Kriging ordinario, sin embargo el uso del IDW no sería errado, ya que la diferencia de error que presenta frente al Kriging ordinario es muy baja y para efectos de cálculo es matemáticamente más sencillo.

Se obtuvo también el error para cada una de las estaciones, aplicándose el error cuadrático medio para los datos obtenidos a lo largo de los 21 eventos sobre cada estación, por el método del Kriging ordinario (Gráfica 1). Con el fin de hacer el error adimensional, se dividió el error para cada estación entre la media para cada estación, de cada variable respectivamente.



Gráfica 1. Error encontrado en cada una de las 11 estaciones, siendo respectivamente: 1.Aranjuez, 2. Bosques del Norte, 3.El Carmen, 4.Emas, 5.Enea, 6.Hospital de Caldas, 7.Ingeominas, 8.La Palma, 9. Posgrados, 10.Recinto, 11.Yarumos.

De la gráfica 1, se observa que las estaciones Enea (5) y Recinto (10) son las que presenta el mayor error en cuanto a intensidad máxima, estando asociadas también a mayor error en la magnitud, sin embargo en magnitud se presenta también un mayor error en la estación La Palma (8) estando asociado a un error en la intensidad máxima también mayor.

Por el método de Kriging ordinario se obtuvieron para cada uno de los eventos once mapas interpolados con la variable magnitud y once mapas interpolados con la variable intensidad máxima.

A manera de ejemplo se presenta la interpolación de la magnitud y la intensidad máxima para el evento ocurrido el 4 de marzo del 2008, por el método de Kriging ordinario. La estación retirada en este caso fue el Carmen, la cual registro la magnitud máxima durante el evento (figura 1 y 2).

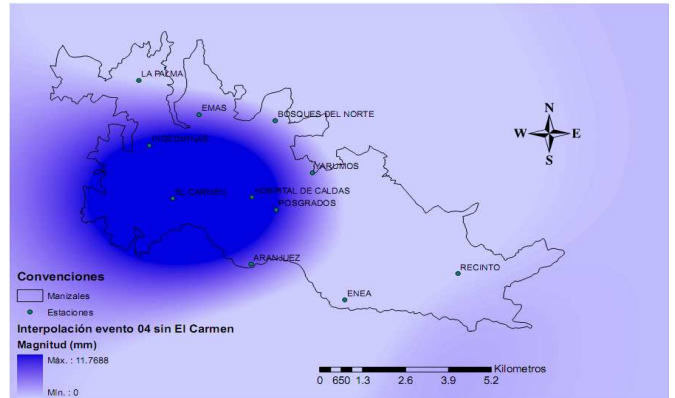


Figura 1. Interpolación de la magnitud (mm) para el evento del 4 de marzo de 2008.

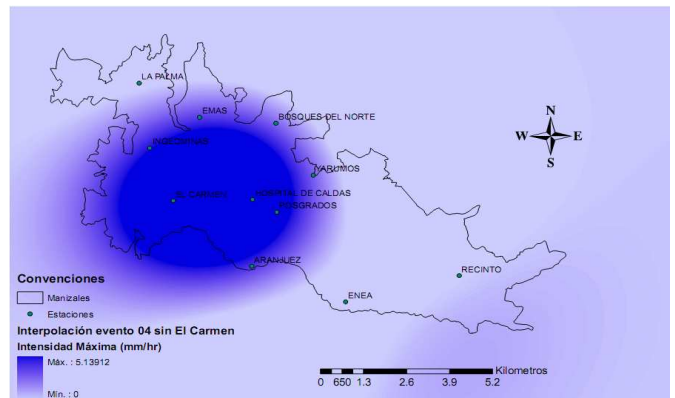


Figura 2. Interpolación de la intensidad máxima (mm/hr) para el evento del 4 de marzo de 2008.

A partir de los once mapas de un evento se obtuvo un mapa de varianza de la magnitud y un mapa de varianza de la intensidad máxima. Se obtuvieron en total 21 mapas de varianza de la magnitud y 21 mapas de varianza de la intensidad.

A manera de ejemplo se presentan los mapas de varianza de la magnitud y la intensidad máxima, para el evento ocurrido el 4 de marzo (figura 3 y 4)

De los mapas obtenidos de varianza de la magnitud, se observa que las zonas de mayor varianza se presentan el 52.4% de los casos hacia el noroeste y suroeste de la ciudad, el 23.8 % hacia el oeste, el 19.1% hacia el norte y el 4.8% de los casos hacia el sur.

De los mapas obtenidos de varianza de la intensidad máxima, se observa que las zonas de mayor varianza se presentan el 61.9% de los casos hacia el noroeste y suroeste de la ciudad, el 9.5% hacia el oeste, el 19.1% hacia el norte y el 9.5% de los casos hacia el centro.

Puede notarse que el suroeste y el noroeste son las direcciones predominantes en cuanto a variabilidad de la magnitud e intensidad, estando asociadas las dos. Hacia el

oeste se presenta mayor variabilidad de las magnitudes sin estar asociadas a mayor variabilidad de las intensidades. En pocos casos se sitúa hacia el norte, sur y centro de la ciudad.

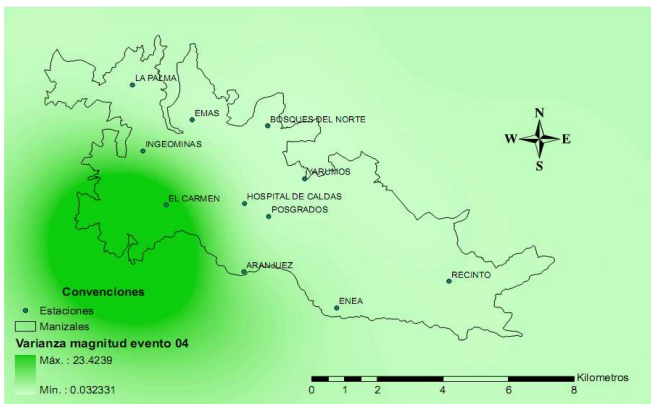


Figura 3. Distribución espacial de la varianza para los campos de magnitud (mm) para el evento del 4 de marzo de 2008.

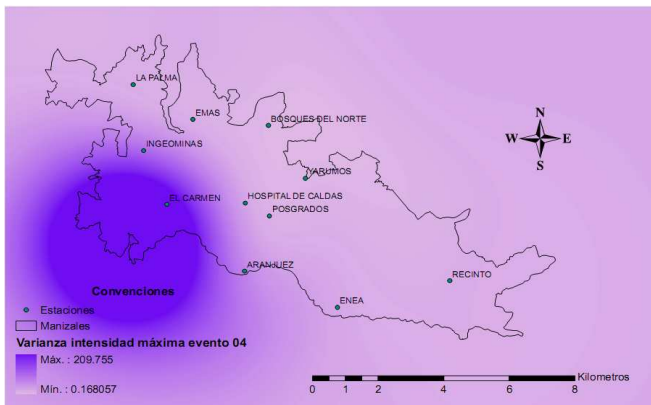


Figura 4. Distribución espacial de la varianza para los campos de intensidad máxima (mm/hr) para el evento del 4 de marzo de 2008.

Por último, con los 231 mapas interpolados se obtuvo un mapa de varianza de la magnitud y un mapa de varianza de la intensidad (figura 7 y 8)

El mapa de varianza de la magnitud muestra que un punto de mayor variabilidad que se presenta hacia el suroeste de la ciudad, entre las estaciones El Carmen e Ingeominas.

El mapa de varianza de la intensidad máxima muestra tres puntos de mayor variabilidad: Hacia el suroeste, noroeste, y la zona norte – centro.

Se encuentra entonces relación entre la variabilidad de la magnitud y de la intensidad máxima hacia la zona oeste de la ciudad.

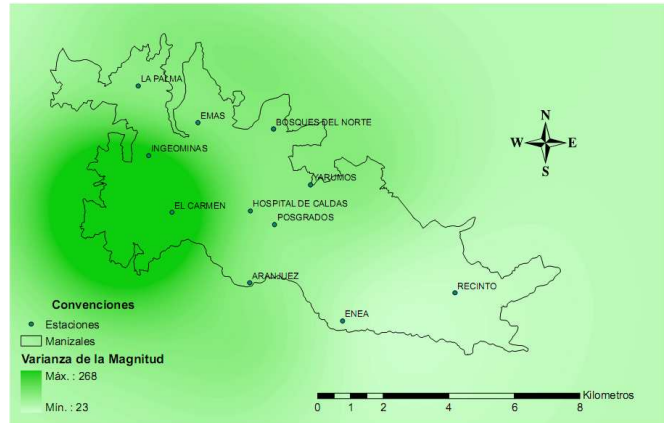


Figura 7. Distribución espacial de la varianza para los campos de magnitud (mm) para los eventos del año 2008.

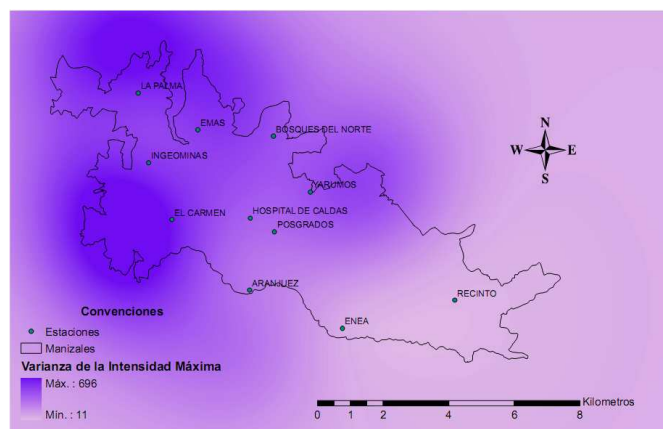


Figura 8. Distribución espacial de la varianza para los campos de intensidad máxima (mm/hr) para los eventos del año 2008.

#### IV. CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que con la densidad de estaciones que se tiene en el perímetro urbano de la ciudad de Manizales y la calidad de los datos, se garantizan errores bajos en la interpolación utilizando cualquiera de los tres métodos analizados.
- La diferencia de error entre los tres métodos es tan pequeña, que a pesar de ser el Kriging el mejor en la validación cruzada, cualquiera de los tres métodos garantiza buenos resultados. El uso de otro método de interpolación con una matemática más simple, como el IDW, también es apropiado para la ciudad de Manizales.
- En el error de las magnitudes e intensidades para una misma estación, puede notarse la coincidencia entre las dos variables, dando esto luces para la detección de estaciones que requieran especial cuidado en la recolección de datos. Sin embargo el error continúa siendo bajo, lo cual genera seguridad en cuanto a la densidad de estaciones que se tiene.
- Las zonas de mayor variabilidad se ubican al noroeste y suroeste de la ciudad, coincidiendo con las zonas donde se presentan los mayores registros de lluvia. Esto da indicios de donde ubicar en un futuro próximas estaciones si lo que se quiere es afinar en la recolección

de datos para entender cómo se comporta la variabilidad de la lluvia y si se quiere reproducir este comportamiento en los modelos hidrológicos y en los métodos de diseño.

- Una vez identificadas las zonas de mayor variabilidad, el siguiente paso será entender estas zonas de máxima varianza desde el estudio de otras variables como la dirección y velocidad del viento.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la DIMA por el apoyo presupuestal de este proyecto, y al IDEA, a través de su GTA en Hidráulica y Ambiental, por la información proporcionada para el desarrollo de esta investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] F. Mejía, A. Pachón, “Monitoreo Climático y Prevención de Desastres en Manizales” en XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Bogotá, 2008, pp. 133–142.
- [2] E. Paturel, M. Desbodes, J.M. Masson, “Evaluation de l’influence de la densité des réseaux pluviométriques sur la d’termination des lames précipitées” Informe LHM 14-16, Plan urbain, 1986.
- [3] A. Torres, *Apuntes de clase sobre Hidrología Urbana*. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2004, pp. 52-53.
- [4] F. Mejía, (2008, octubre) Apuntes sobre el clima en la ciudad de Manizales. Boletín Ambiental 68. 7 Páginas. Disponible en: <http://www.manizales.unal.edu.co/idea/BoletinAmbiental>
- [5] J. Velez, m. Valencia, A. Londoño, C. Gonzales, J Mariscal, *Contaminación del aire y lluvia ácida. Diagnóstico del fenómeno en la ciudad de Manizales*. Manizales. Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [6] Alcaldía de Manizales. *Situación en la que se encuentra la Ciudad. Comunicado de prensa*. Lunes, 17 de noviembre de 2008. Unidad de divulgación y Prensa. Disponible en: <http://www.alcaldiamanizales.gov.co>
- [7] *Catálogo de Surfer*, Santiago de Cali, Noviembre de 1998, cap. 1.2.6.2.
- [8] J. Fallas. *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. 2007. pp. 11. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/7500742/Mde-Teoria-2007>
- [9] Y. Panatier. VARIOWIN 2.21. Disponible en: <http://www.springer-ny.com/supplements/variowin.html>
- [10] *Manual de ArcGis Modulo Spatial Analyst*, pp. 26. Disponible en: <http://www.emagister.com>