

## Análisis de la variabilidad espacial en la precipitación en la zona metropolitana de Querétaro empleando ecuaciones de anisotropía

### *Temporal and spatial variability analysis of daily precipitation in the metropolitan area of Queretaro, using an anisotropy scheme*

Alfonso Gutiérrez-López,\* Mabel Fortanell Trejo,\*\* Nadia Ingrid Albuquerque Gonzalez\*\*\* y Fernando Bravo Prado\*\*\*\*

Recibido: 07/08/2018. Aceptado: 07/03/2019. Publicado en línea: 11/04/2019.

**Resumen.** La cartografía en hidrología es una de las formas tradicionales de representar la variabilidad espacial de eventos climáticos y ambientales. Sin embargo, pocas veces se pone atención a cómo se construyen, por ejemplo, los mapas de isoyetas. Una incorrecta selección del método de interpolación espacial puede ocasionar errores en la estimación de magnitudes. Se realiza una caracterización espacial y temporal de la variabilidad en la precipitación horaria de la zona metropolitana de Santiago de Querétaro. Se utilizan láminas de lluvia medidas a cada minuto de las diez tormentas más intensas registradas en los años 2013, 2014 y 2015. Utilizando variogramas direccionales, distancia entre estaciones y un esquema de anisotropía se obtienen los parámetros óptimos a emplear en una interpolación por Kriging. Los resultados muestran que en el mes de junio existe una mayor variabilidad de la precipitación en la zona metropolitana y que la lámina de precipitación tiene una correlación directa con la distancia entre estaciones. El análisis permite seleccionar de forma correcta los variogramas direccionales que deben emplearse para la interpolación espacial y la cartografía de campos de lluvia.

**Palabras clave:** precipitación, anisotropía, variograma, geoestadística, Querétaro-México

**Abstract.** Cartography in hydrology is one of the traditional ways of representing the spatial variability of climatic and environmental events. However, attention is hardly ever focused on how, for example, isohyets maps are constructed. Incorrect selection of the spatial interpolation method can lead to errors in the estimation of magnitudes. Because the early warning systems that work in the State of Querétaro and are used by the Civil Protection authorities during the rainy season, they transmit their information every minute. It is necessary to have spatial interpolation tools that allow us to obtain values with a minimum of error. The warning systems have a spatial interpolation subroutine (cartography) incorporated, in such a way that the authorities can estimate in real time the precipitation level in a determined place, even though there is no meteorological station in situ. A spatial and temporal characterization of the variability in the hourly precipitation of the metropolitan area of Santiago de Querétaro is carried out. Rain gauges are used, measured at each minute of the ten most intense storms recorded in the years 2013, 2014 and 2015. Using directional variograms, distance between stations and an anisotropy scheme, the optimal parameters to be used in a Kriging interpolation are obtained. The comparison of the variograms, for example for the month of July, for the years 2013, 2014, 2015

\* Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ. Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas S/N, Las Campanas, 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. Autor de correspondencia: alfonso.gutierrez@uaq.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2770-8642>)

\*\* <https://orcid.org/0000-0002-9504-2048>

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-9418-3247>

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-4304-1737>

made it possible to identify that the range of validity of the measurements (distance) does not change in spite of the fact that the theoretical formulation of the variogram is modified. In this way, a parameter called alpha can be introduced to explain the spatial variability of rainfall. This is useful because it shows that the precipitation record is a function of the distance at which the observations are valid, something that was already known but not verified in urban areas. The results show that in June there is a greater variability of precipitation in the metropolitan area and that the precipitation pattern has a direct correlation with the distance between rain stations. The analysis allows the correct selection of directional variograms to be used for spatial interpolation and rain field mapping. As an example, data are taken from the storm of August 18, 2014, which was a severe storm that caused severe economic and material damage in the metropolitan area of the city of Queretaro. With this scheme of variability was made the mapping of the

isohyets of the storm that day, considering an interpolation with traditional Kriging and a cartography affected by a directional variogram and the alpha parameter. In order to validate the proposed methodology, a cross validation was carried out with the Historical Center rain station, as it is the area most attended by the authorities during the rainy season. The station data were omitted in the estimation of the interpolation of the grid to generate the cartography. Also, 7800 points were calculated to generate a grid interpolated with the proposed formulation and it was demonstrated that the estimated values are acceptable. The results of this work will make it possible to calibrate the spatial interpolation models that work in the hydro-informatics tools used by the Civil Protection authorities.

**Key words:** precipitation, anisotropy, variograph, geostatistics, Queretaro-Mexico

## INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica y el Caribe la gestión del riego por fenómenos hidrometeorológicos sigue siendo uno de los grandes retos a enfrentar. La mayoría de los países de nuestra región sufren un estrés hídrico y cada día es evidente la necesidad de adoptar políticas encaminadas a enfrentar no solo los efectos de los desastres, sino también el manejo del riesgo y la resiliencia de las comunidades afectadas. El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO en su Fase VIII propone llevar a cabo acciones específicas en los temas de desastres hídricos y cambios hidrológicos, buscando una adaptación a cambios globales. Estas acciones dan prioridad a tres aspectos fundamentales en los cuales nuestros países deben trabajar: 1) el conocimiento de los impactos conjuntos por procesos humanos y naturales; 2) adquisición remota de datos y validación en campo y (3) manejo de la incertidumbre y la mejora en la comunicación de riesgos (Jimenez-Cisneros, 2015). La estimación del riesgo y la vulnerabilidad requieren procesos cada vez más complejos y análisis probabilísticos más detallados para enfrentar la ocurrencia en tiempo y espacio de fenómenos extremos cada vez más severos (Gutiérrez-López, Lebel, Ruíz, Descroix y Duhne, 2015).

Por otro lado, las cuencas peri-urbanas se ven cada vez más afectadas y las concentraciones de población son menos capaces de adoptar una resi-

liencia acorde con la dimensión urbano-rural de los patrones espaciales de la vulnerabilidad (Vera y López, 2010; Löwe, Urich, Sto. Domingo, Mark, Deletic y Arnbjerg-Nielsen, 2017). La intervención en un territorio posdesastre, respecto al desempeño institucional en la conservación de los recursos naturales y el espacio urbano es deficiente en casi todos los países de nuestra región. Trabajos realizados en Brasil, Chile y México han mostrado que los análisis espaciales de variables hidrológicas permiten una mejora en el conocimiento de los factores que ayudan a la disminución del riesgo (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007; Toscana, Campos y Monroy, 2010; Pérez, Maderey, Pereyra y Filobello, 2012). En todos los casos, el ordenamiento territorial sigue siendo la mejor medida de reducción del riesgo de inundación (Pérez-Morales, Gil-Guirado y Olcina, 2016).

México, por su ubicación geográfica, se encuentra expuesto cada año a múltiples daños ocasionados por diversos fenómenos hidrometeorológicos, tales como depresiones tropicales, tormentas y huracanes (Méndez, Nívar y González, 2008). Dichos fenómenos provienen tanto del océano Pacífico como del Atlántico y cada año se presentan de forma variable. 2013 fue muy intenso, en especial durante el mes de septiembre, cuando la lámina histórica de precipitación aumentó un 60%, respecto del promedio histórico, se registró un promedio mensual de 227.3 mm, que superó el registro ocurrido en el año 1955 de 212.1 mm

(CONAGUA, 2016). Los registros de precipitación ubicaron a dicho mes de septiembre como el más lluvioso desde que iniciaron los registros en 1941. Lo anterior se explica porque en septiembre de 2013 se presentaron los huracanes Ingrid y Manuel (CONAGUA, 2016). La intensidad de precipitación de estos huracanes se ilustra en la Figura 1. Fue tal su intensidad que provocaron que más de 60 mil personas abandonaran sus viviendas, numerosos daños a las vías de comunicación (casi cien carreteras y autopistas federales afectadas). También se provocaron daños en escuelas (43 mil) y en centros de salud (1153 hospitales y clínicas dañadas) (García-Arróliga, Méndez-Estrada, Reyes-Rodríguez y Marin-Cambranis, 2013; González-Villarreal, Domínguez-Mares y Arriaga-Medina, 2013). Asimismo, cinco estados fueron afectados en sus labores de agricultura, ganadería y acuicultura. Se contabilizaron un total de 20 755 viviendas afectadas, de las cuales 4464 sufrieron daños menores y el resto resultaron sujetas a reubicación

o reconstrucción. En el estado de Guerrero se registraron 13 701 viviendas afectadas, de las cuales se reconstruyeron 9046, se destruyeron 3973 y 2157 fueron reubicadas (SEDATU, 2013). Si bien estos fenómenos son perjudiciales para la economía y para la sociedad de la región costera del país, también conllevan beneficios a las regiones Centro y Bajío, donde las lluvias que provocan los huracanes y tormentas tropicales permiten la recarga de los acuíferos, presas y demás cuerpos de agua superficial.

Por el contrario, el crecimiento de las zonas urbanas y el desmedido cambio de uso de suelo provocan un aumento en los volúmenes de escurrimiento superficial. Bajo estas condiciones se disminuye la capacidad de drenaje y los sistemas de desagüe colapsan. Se producen inundaciones, encharcamientos y caos vial en las zonas urbanas, donde no se cuenta con infraestructura adecuada ni con sistemas de alertamiento temprano que active protocolos para mitigar el riesgo de daño (Golian, Saghafian, Elmi y Maknoon, 2011; Gutiérrez, Var-

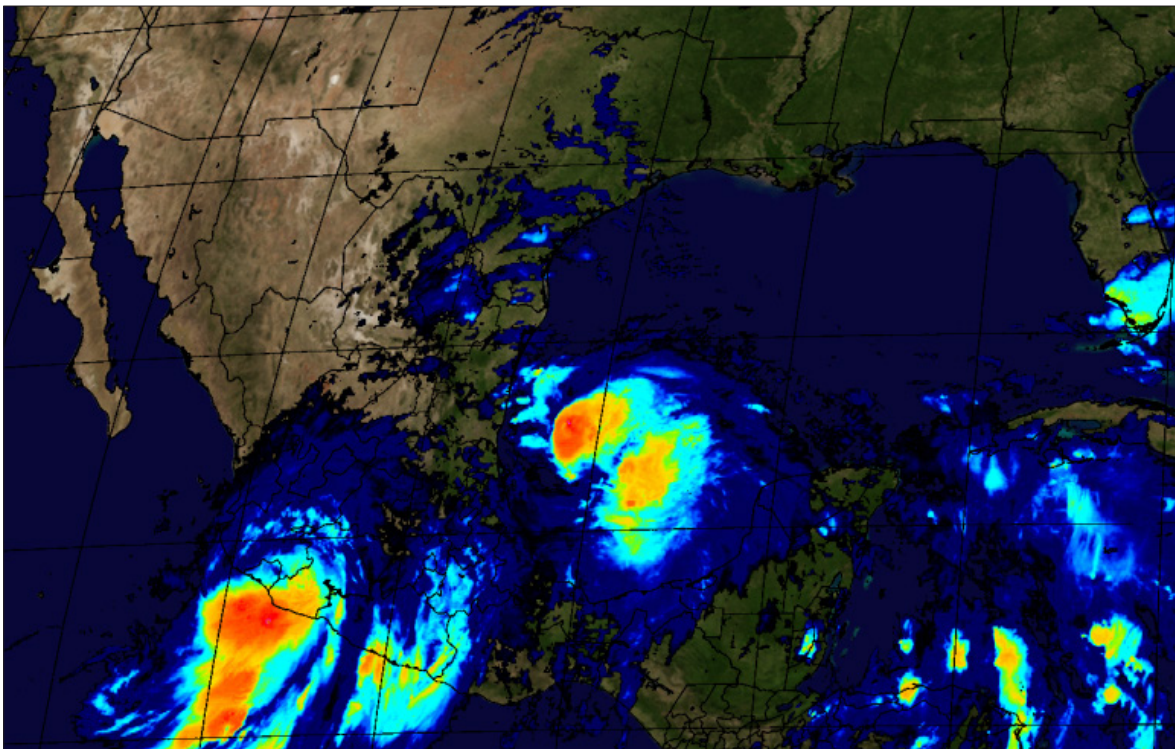


Figura 1. Imagen de intensidades de precipitación (mm/h) a partir del hidroestimador (elaboración propia) de los eventos meteorológicos, el Huracán Categoría I Manuel en el Pacífico y la tormenta tropical Ingrid en el Atlántico (septiembre 2013).

gas, Romero, Plácido de la Cruz, Aguirre y Silva, 2011). En la ciudad de Querétaro, en el centro de la república mexicana, se cuenta con una red de 40 estaciones, distribuidas en el territorio del estado, y casi 20 se concentran en la ciudad capital. La adquisición de información se realiza cada minuto y actualmente se cuenta con una base de más de 20 millones de datos adquiridos (Aguilar, Pastor, Vázquez e Ibarra, 2018; Gil, Ramírez, Muñoz y González, 2018). Esta red constituye uno de los sistemas más avanzados en Latinoamérica y el Caribe, pues además se han desarrollado más de 30 herramientas de hidro-informática que permiten realizar diversos análisis en tiempo real. La Tabla 1 muestra las variables climáticas que son monitoreadas por dicha red.

Debido a que los sistemas de alerta temprana que funcionan en el estado de Querétaro, y que son empleados por las autoridades de Protección Civil durante la temporada de lluvias, transmiten a cada minuto su información, es necesario contar con herramientas de interpolación espacial que permitan obtener valores con un mínimo de error. Los semáforos de alerta tienen incorporada una subrutina de interpolación espacial (cartografía), de tal manera que las autoridades pueden estimar en tiempo real la lámina de precipitación en un

sitio determinado, a pesar de que no exista una estación meteorológica *in situ* (Gutiérrez-Oliva, Estrada, Morales y Castillo, 2018). En esta labor, la cartografía de mapas de isoyetas es de gran importancia y la precisión y detalle de las láminas e intensidades de precipitación son vitales para detonar los protocolos de intervención de las autoridades. En este trabajo se propone utilizar funciones matemáticas de anisotropía (conocidas como variogramas-direccionales), para representar la variabilidad espacial de la precipitación sobre una zona urbana. Los variogramas son utilizados para generar mapas de isoyetas considerando la variabilidad espacial de variables climáticas asociadas con intensidades monitoreadas en tiempo real. Es importante mencionar que pocas veces se pone atención a cómo se construyen los mapas de isoyetas. La correcta representación cartográfica de un fenómeno medido a tiempo real es, sin duda, de gran importancia en la hidrología operacional moderna.

## OBJETIVO

El presente trabajo tiene como objetivo principal presentar una caracterización anisotrópica de las precipitaciones ocurridas en la ciudad de Querétaro, así como ejemplificar la correcta selección de los variogramas direccionales que deben emplearse para la interpolación espacial y la cartografía de campos de lluvia en tiempo real.

Tabla 1. Variables climáticas que son monitoreadas a tiempo real, por la Red de precipitaciones extremas del estado de Querétaro.

Variable	Unidad
Temperatura	Grados centígrados
Precipitación pluvial	Milímetros
Intensidad de lluvia	Milímetros por hora
Velocidad del viento	Metros por minuto
Dirección del viento	Grados Azimut
Radiación solar	Watts sobre metros cuadrados
Punto de rocío	Grados centígrados
Humedad	Porcentaje
Presión atmosférica	Milibares
Índice de calor	Grados centígrados
Sensación térmica	Grados centígrados

## METODOLOGÍA

### Fundamentación teórica

El análisis espacial de variables hidrológicas es, sin duda, uno de los grandes retos de la hidrología moderna. No solo el análisis, sino la representación espacial de variables climáticas, representan un reto y una actividad de gran precisión. A partir de la densidad espacial de los sitios de medición se define una estructura espacial y los patrones de comportamiento dentro de un espacio geográfico (Chou, 2010). Actualmente, se emplean métodos de interpolación espacial para medir y representar

cartográficamente casi cualquier medición en campo. Si se trabaja con un espacio bi-dimensional, existirá una relación entre las mediciones efectuadas, producto principalmente de la distancia que los separa, y de la dirección entre dichos puntos de medición. Bajo la hipótesis de que existe una función matemática que representa la variabilidad espacial de la medición efectuada en un entorno o vecindad de un punto, esta medición puede presentar una variación espacial debida a que algunos procesos físicos tienen una cierta orientación predominante. Es decir, se trata de fenómenos con tendencias anisotrópicas (Haining, 2003). La Figura 2 muestra un hipotético campo muestral en donde para cada punto de medición existe una distancia ( $h$ ) y una dirección asociada a su propia medición. Se utilizan líneas radiales para conocer la variabilidad de las mediciones (Hoover y Wolman, 2005). El variograma, también conocido como semivariograma, es una expresión matemática que muestra la variabilidad espacial entre los valores medidos espacialmente; es decir, mide la variabilidad de las mediciones en diferentes direcciones (anisotropía). De esta forma, cualquier modelo de variograma representará correlaciones espaciales

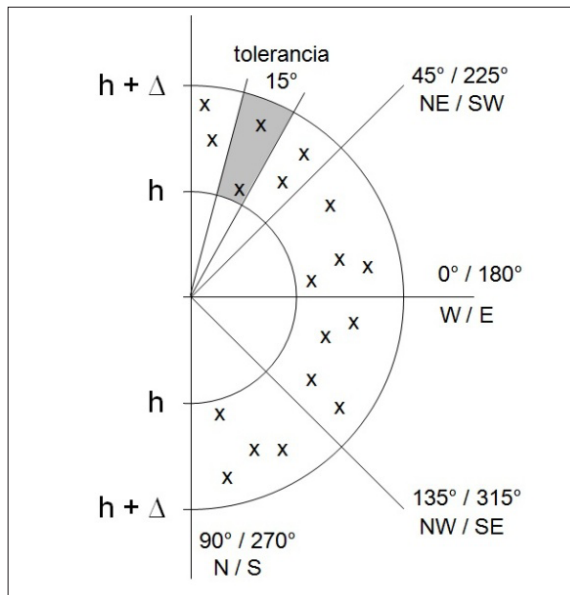


Figura 2. Vecindad de un punto con una banda de distancia  $h + \Delta$  y segmentos de  $45^\circ$ . Fuente: elaboración propia.

entre los sitios de muestreo, lo que constituye el principio básico en el estudio de la variabilidad espacial de variables regionalizadas (Creutin y Obled, 1982). Para realizar un análisis espacial con funciones anisotrópicas se requieren tres etapas: 1) verificar la homogeneidad de los datos medidos; 2) reconocer los patrones de variaciones temporales de los datos (tendencias, componentes cíclicos, etapas estacionales, extremos fuera de rango, etc.) y 3) la simulación o predicción de nuevos valores a partir de las mediciones (Méndez-Venegas, Herrera, Díaz-Viera y Valdés-Manzanilla, 2013).

El Kriging en tanto método de interpolación espacial se basa en herramientas matemáticas como el variograma para el análisis de los datos medidos (ecuación 1) (Lin y Chen, 2004). La principal hipótesis en la construcción de un variograma es que, mientras aumenta la distancia, los valores en cada punto dejan de tener correlación (Schlünzen, Hoffmann, Rosenhagen y Riecke, 2009). Sin embargo, en la práctica los valores no se presentan en patrones uniformes, por lo que es necesario emplear esta herramienta geoestadística para cuantificar la correlación espacial entre los valores monitoreados. Actualmente se utilizan una gran variedad de métodos de interpolación espacial. El procedimiento más empleado para el fenómeno de la precipitación es el Kriging ordinario, el cual utiliza un variograma direccional, el Co-Kriging, que utiliza una segunda variable que interviene en la construcción del variograma y el Kriging con deriva que permite introducir un comportamiento inicial en las variables regionales (Adhikary, Muttill y Yilmaz, 2015; Dubois, Malczewski y Cort, 1998; Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005). En ese sentido, el variograma resulta ser una herramienta simple y acertada para identificar patrones espaciales en estudios hidrológicos (Hoover y Wolman, 2005; Zhao, Xiao, Zhou, Cheng, Wang, Yin y Ren, 2011).

La formulación matemática del variograma está dada por la diferencia de cuadrados entre un par de mediciones ( $Z$ ), en un punto  $X$ . El análisis se realiza tomando parejas (pares) de valores medidos y la continuidad espacial se expresa en un incremento de la distancia ( $h$ ). Lo anterior puede expresarse de la forma siguiente:



Tabla 2. Localización y láminas mensuales de las estaciones climatológicas empleadas en el estudio.

ID	Estación	Latitud	Longitud	Lamina julio Hp (mm)		
				2013	2014	2015
1	Chulavista	20.632	-100.471	120.6	96.2	101.9
2	Belén	20.653	-100.408	123.2	130.9	131.9
3	Real del Parque	20.611	-100.403	31.0	57.9	87.8
4	Candiles	20.547	-100.401	110.6	21.7	136.3
5	Cimatario	20.559	-100.376	114.3	67.5	104.6
6	Centro Histórico	20.594	-100.389	92.1	52.9	87.0
7	Milenio	20.595	-100.346	121.3	91.0	69.8
8	El Refugio	20.654	-100.352	146.8	119.1	79.5
9	Cotas-Amazcala	20.710	-100.336	SD	70.8	110.0
10	UQA-CU	20.591	-100.412	SD	70.2	91.0
11	Geociencia	20.701	-100.444	SD	131.3	108.5
12	Viñedos*	20.608	-100.489	SD	SD	79.7
13	San José el Alto*	20.649	-100.387	SD	SD	113.3
14	Sta R. Jauregui*	20.742	-100.447	SD	SD	177.9
15	Parque Ind. Qro*.	20.710	-100.444	SD	SD	101.9
			Promedio	107.49	82.68	105.41

\* Estaciones instaladas a partir de 2015.

Tabla 3. Distancia en kilómetros y (pares a 45°) para los meses de junio, julio, agosto y septiembre para el año 2013.

Mes	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Dirección	Rango en kilómetros				
0 W-E	2.7 (1)	4.2 (1)	2.7 (1)	4.2 (1)	3.45
45 NE-SW	2.7 (1)	4.2 (1)	2.7 (1)	4.2 (1)	3.45
90 N-S	5.0 (1)	4.2 (1)	4.2 (1)	3.7 (1)	4.28
135 NW-SE	4.2 (1)	4.2 (1)	4.2 (1)	3.7 (1)	4.20
Cambios	3	1	2	2	

Tabla 4. Distancia en kilómetros y (pares a 45°) para los meses de junio, julio, agosto y septiembre para el año 2014.

Mes	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Dirección	Rango en kilómetros				
0 W-E	3.0 (1)	3.5 (1)	7.0 (2)	7.0 (2)	5.13
45 NE-SW	9.7 (1)	7.0 (1)	8.0 (1)	7.5 (2)	8.05
90 N-S	9.0 (1)	8.7 (1)	8.7 (1)	7.5 (1)	8.48
135 NW-SE	8.5 (1)	6.0 (2)	7.0 (3)	7.0 (3)	7.13
Cambios	4	4	3	2	

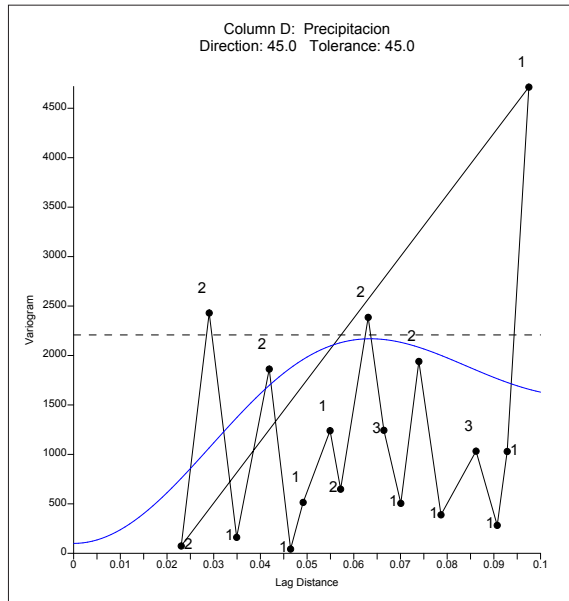


Figura 4. Variograma del mes de junio del año 2014, con dirección de 45° y tolerancia de 45°. Fuente: elaboración propia.

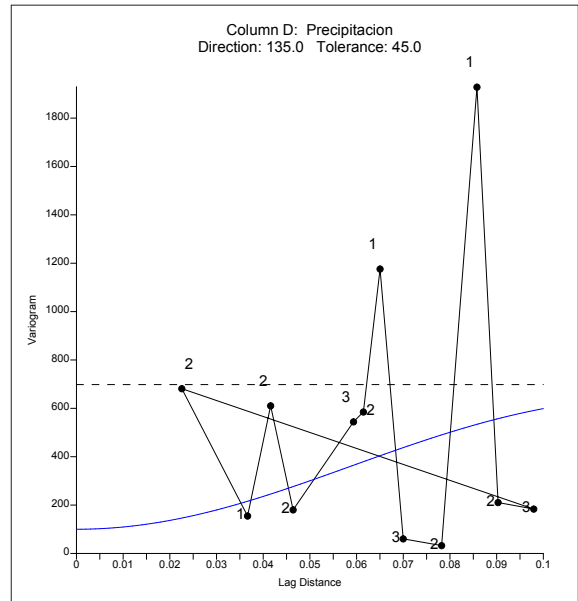


Figura 5. Variograma del mes de junio del año 2015, con dirección de 135° y tolerancia de 45°. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Distancia en kilómetros y (pares a 45°) para los meses de junio, julio y septiembre para el año 2015.

Mes	Junio	Julio	Septiembre	Promedio
Dirección	Rango en kilómetros			
0 W-E	7.5 (1)	6.0 (1)	7.0 (2)	6.83
45 NE-SW	8.0 (1)	5.0 (1)	8.0 (1)	7.00
90 N-S	8.0 (1)	6.5 (1)	8.0 (1)	7.50
135 NW-SE	8.5 (1)	6.5 (1)	8.5 (1)	7.83
Cambios	3	3	3	

en dos meses, junio y septiembre, con dirección de 135° (NW/SE) y una tolerancia de 45°.

## DISCUSIÓN

A partir de los resultados de los tres años más lluviosos se reconoce que el mes que presenta el valor más alto de variabilidad espacial es junio de 2013; para la dirección 90° N-S. Para el año 2014, junio fue una vez más el mes de mayor variabilidad; sin embargo, ahora para una dirección de 45°NW-SE. Para el análisis del año 2015, los meses de junio

y septiembre fueron los que registraron mayor variabilidad, correspondiente a la dirección de 135° NW-SE. En un intento de obtener un mayor detalle en la variabilidad espacial de las precipitaciones registradas en la zona urbana de la ciudad de Querétaro, se consideran los datos de las estaciones con un periodo de registro mayor a través de los años, lo que corresponde a las estaciones instaladas desde 2013 (Chulavista, Belén, Real del Parque, Candiles, Cimatarío, Centro histórico, Milenio y Refugio, todas ellas prioritariamente en la zona urbana). Si se observa la distancia *h* (rango) en las Tablas 3, 4



y 5, existe una consistencia respecto a la distancia de validez de las mediciones. Por ejemplo, para los meses de julio y septiembre se presentan uno o dos cambios en los valores del rango. Es decir, no hay cambio en la distancia de variabilidad. Adicionalmente, de este análisis se observa que la dirección 135 NW-SE presenta la mayor variabilidad con diferentes valores para los tres años. A partir de los datos se identificó que la dirección de 135 NW-SE corresponde curiosamente a la dirección en la que la ciudad ha crecido más durante los últimos años. Este hecho podría explicar algunas zonas de calor en aumento en la zona peri-urbana. Respecto a la distancia (h), los resultados del análisis de anisotropía muestran que su variabilidad espacial es errática para el mes de septiembre y permanente para el mes de julio. Por lo tanto, para realizar cualquier interpolación espacial sobre esta zona se deben utilizar las direcciones 0°W-E, 45° NE-SW, 90° N-S y 135° NW-SE para el mes de julio para los años 2013, 2014, y 2015 (véase Tabla 6). Se observa un fenómeno de anisotropía en todos los años y en el 75% de las direcciones excepto 0°W-E. El año 2013 muestra el rango de variabilidad promedio más bajo de los tres años, de 2.7 km (véase Tabla 3). La mayor magnitud en la variabilidad es de 9.7 km y corresponde al año 2014 en la dirección 45 NE-SW. Como se puede verificar en la Tabla 6, para el año 2015 la variabilidad es la misma en las direcciones 45° NE-SW y 90° N-S. La Tabla 7 muestra el comportamiento de los datos omnidireccionalmente (tolerancia 90°), es decir, tomando en cuenta la ubicación de la totalidad de las estaciones. Es notable la disminución de la distancia (h) entre pares de estaciones con variabi-

Tabla 6. Resumen de pares y distancias (h) en kilómetros para el mes de julio de 2013, 2014 y 2015 evaluados en tolerancia 45°.

Año	2013	2014	2015
Dirección	Rango en kilómetros		
0 W-E	4.2 (1)	3.5 (1)	6.0 (1)
45 NE-SW	4.2 (1)	7.0 (1)	5.0 (1)
90 N-S	4.2 (1)	8.7 (1)	6.5 (1)
135 NW-SE	4.2 (1)	6.0 (2)	6.5 (1)

lidad extrema en tolerancia 90° y omnidireccional para los años 2013, 2014 y 2015.

La Figura 6 compara los variogramas omnidireccionales para el mes de julio para los años 2013, 2014 y 2015. Al analizar los tres años se identificó que el rango (distancia) no cambia a pesar de que se modifique la formulación teórica del variograma. De esta forma puede introducirse un parámetro de forma denominado  $\alpha$  que permite explicar la variabilidad espacial de las precipitaciones (ecuación 2). Esto es útil ya que, como se ha demostrado, la variabilidad espacial de las precipitaciones es función de la distancia en la que las mediciones son válidas, algo de lo que ya se tenía noción pero no en zonas urbanas (Sideris, Gabella, Erdin y Germann, 2013; Duan, Zheng, Li, Liu y Luo, 2017). Samper

Tabla 7. Comportamiento omnidireccional para el mes de julio de 2013, 2014 y 2015.

Año	2013	2014	2015	Promedio
Dirección	Rango (kilómetros)			
0	4.25(2)	4(1)	2.75(1)	3.67

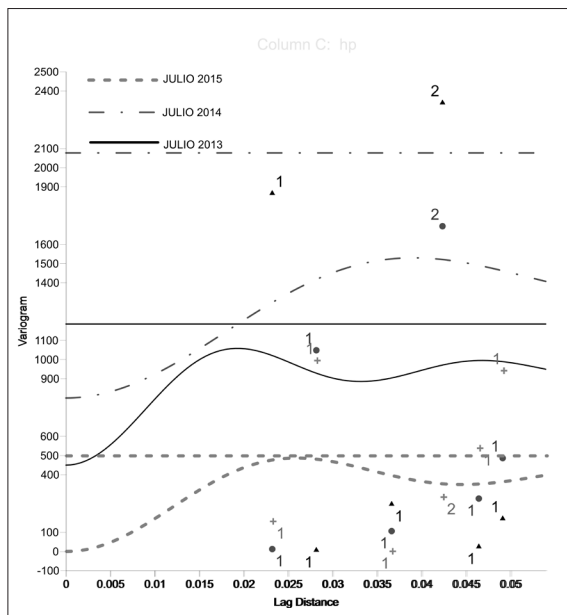


Figura 6. Comparativa de los variogramas-direccionales para el mes de julio para los años 2013 (línea continua), 2014 (línea-punto) y 2015 (línea discontinua). Fuente: elaboración propia.

y Carrera (1996, p. 53), llaman a este efecto, efecto de proporcionalidad.

Los variogramas son distintos de tamaño pero de forma similar, lo cual se aprecia muy bien en la Figura 6. Así, “multiplicándolos por una constante  $\alpha$ ”, se les puede hacer coincidir logrando así una cuasi-estacionariedad. Adicionalmente, se piensa que estos resultados, que detallan la variabilidad espacial de las precipitaciones, pueden servir para verificar la ocurrencia de fenómenos climáticos como el ENSO (Campling, Gobin y Feyen, 2001). En este aspecto, Bravo-Cabrera, Azpra-Romero, Rodríguez-Gonzalez. y Rodríguez-López (2018) presentan un análisis sobre la relación que existe entre el fenómeno de El Niño (caracterizado por el Índice Multivariado del ENSO) y la precipitación en la Ciudad de México en escala anual. Los resultados del análisis espacial y temporal de la lluvia media anual demuestran que no existe una tendencia lineal durante el periodo 1950-2010; sin embargo, si se detecta un ciclo de variación (que pudiera ser caracterizado por un variograma direccional). La fase negativa de ENSO disminuye la precipitación en la Ciudad de México y en la fase neutra aumenta la precipitación y disminuye la probabilidad de que la precipitación sea inferior al valor medio. Si aceptamos este estudio y la

presencia de variogramas proporcionales, “no debe sorprender que la constante multiplicativa sea una función de los valores medios” (Samper y Carrera, 1996, p. 52). Delhomme (1978), propone un variograma afectado por una constante que tiene la forma.

$$\gamma(h) = \frac{\sigma_x^2}{\bar{x}} \hat{\gamma}(h) \tag{2}$$

donde  $\gamma(h)$  es el variograma de la tormenta.  $\sigma_x^2$  es la varianza muestral (véanse Tabla 8 y Figura 6).  $\bar{x}$  es la media de los registros históricos y  $\hat{\gamma}(h)$  es el variograma experimental. Por lo tanto, estos resultados permiten proponer un parámetro  $\alpha$ , el cual hace posible una interpolación de variables hidrológicas como, por ejemplo, la precipitación sobre una zona urbana (ecuación 3).

$$\gamma(h) = \alpha \frac{1}{2} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \tag{3}$$

donde

$$\alpha = \frac{\text{varianza} \cdot \text{rango}}{(\text{precipitación media})^2} \tag{4}$$

La Tabla 8 muestra los elementos necesarios para el cálculo del parámetro alfa. Con esta formulación se puede asegurar que, si , las condiciones climáticas se asemejan a los escenarios del fenó-

Tabla 8. Comportamiento omnidireccional para el mes de julio de 2013, 2014 y 2015.

Dirección	Año	Rango (km)	Varianza (km)	Hp media (mm)	Alfa
0 W-E	2013	4.2	1200	107.49	0.44
	2014	3.5	2095	82.68	1.07
	2015	6.0	500	105.41	0.27
45 NE-SW	2013	4.2	1200	107.49	0.44
	2014	7.0	2095	82.68	2.15
	2015	5.0	500	105.41	0.22
90 N-S	2013	4.2	1200	107.49	0.44
	2014	8.7	2095	82.68	2.67
	2015	6.5	500	105.41	0.29
135 NW-SE	2013	4.2	1200	107.49	0.44
	2014	6.0	2095	82.68	1.84
	2015	6.5	500	105.41	0.29

meno de El Niño. Si los valores son se presenta un año neutral. Para nuestro ejemplo, los años 2013 y 2014 resultaron años neutros, mientras que 2015 resultó con presencia del fenómeno del Niño. Estos resultados pueden verificarse mes a mes para cada uno de los años mencionados en NOAA (2019).

Finalmente, se utilizan estas formulaciones matemáticas anisotrópicas para representar las isoyetas de una tormenta similar a las realizadas por Tarawneh y Şen (2011) y Zhao *et al.*, (2011). En este caso, se ejemplifica con las isoyetas de la tormenta del 18 de agosto de 2014, una tormenta severa que causó graves daños económicos y materiales en la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro. Con este esquema de variabilidad se realizó la cartografía de las isoyetas de la tormenta de ese día; considerando una interpolación con Kriging tradicional (Figura 7) y una cartografía afectada por un variograma direccional y el parámetro  $\alpha$

(Figura 8). Si se observan ambas cartografías no parecerían muy diferentes, sin embargo, cuando se trata de estimar eventos en tiempo real la precisión es de gran importancia (Kebaili-Bargaoui y Chebibi, 2009). Si se observan a detalle ambas figuras, el centro de la tormenta está desfasado, lo que representa al menos dos kilómetros de diferencia en distancia horizontal. Esta pequeña diferencia puede significar tres o cuatro cuadas y un centenar de casas afectadas por el centro de la tormenta. En la cartografía realizada con el Kriging tradicional (Figura 7) se observa un área de evolución mayor de la tormenta. Mientras que para la cartografía, tomando en cuenta la anisotropía (Figura 8), el sistema de tormenta se desarrolla en un área menor. Otro caso a mencionar es la zona de Santa Rosa Jáuregui, que para el primer caso se encuentra en una isoyeta de 50-55 mm, y tomando anisotropía, las autoridades verían una lámina de precipitación cercana a los 50 mm. Dados los protocolos de

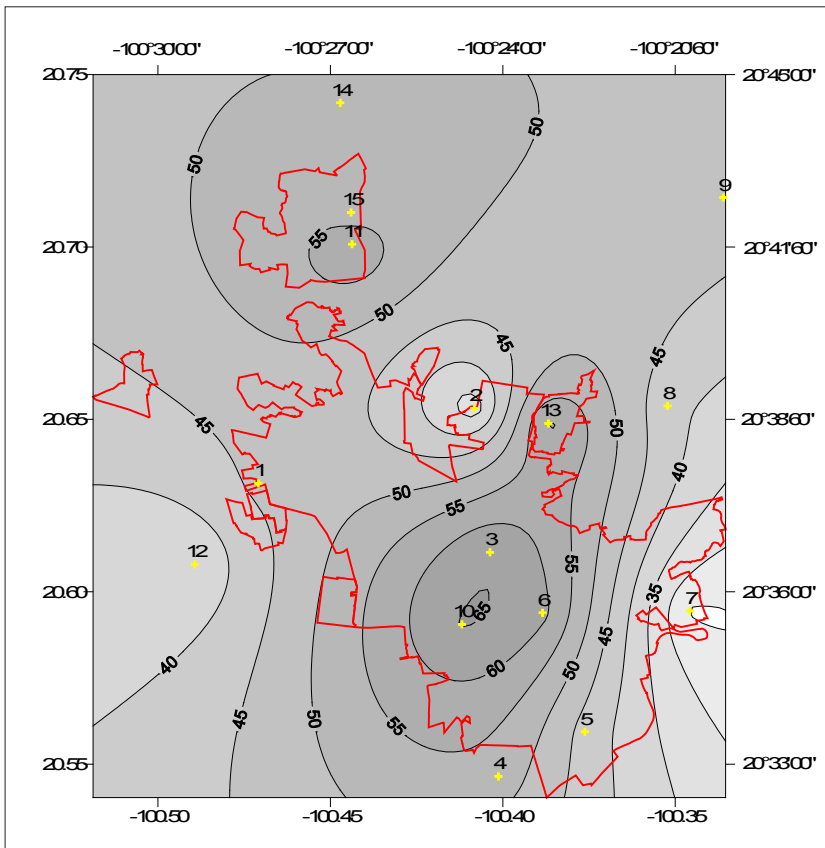


Figura 7. Cartografía de las isoyetas de la tormenta del 18 de agosto 2014 sobre la zona metropolitana de Querétaro, considerando una interpolación con Kriging normal. Fuente: elaboración propia.

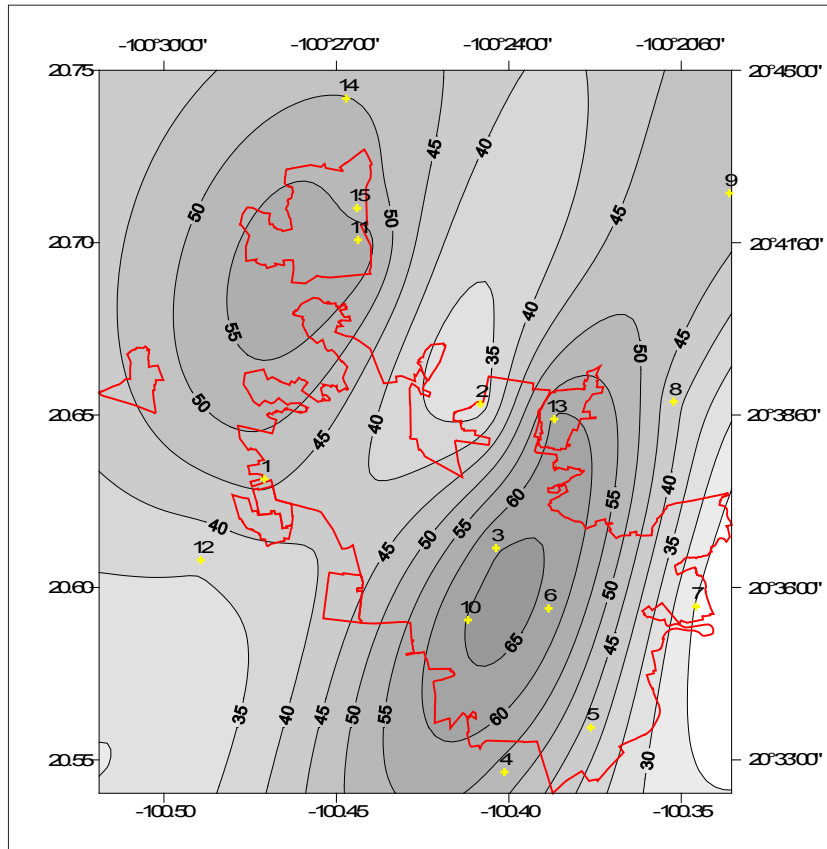


Figura 8. Cartografía de las isoyetas de la tormenta del 18 de agosto 2014 sobre la zona metropolitana de Querétaro, considerando una interpolación con Kriging afectada por un variograma direccional y el parámetro  $\alpha$ . Fuente: elaboración propia.

intervención de Protección Civil, estos 5 mm podrían significar intervenir o no. Para validar la metodología propuesta se realizó una validación cruzada con la estación del Centro Histórico, por ser la zona más atendida por las autoridades en época de lluvia. Se omitieron los registros de estación en la estimación de la interpolación de las mallas para generar la cartografía de las figuras 7 y 8. El valor real de la precipitación medida en este sitio fue de 61.40 mm para la tormenta del 18 de agosto de 2014. Mientras que el valor estimado con la metodología propuesta resultó de 62.47 mm acumulado en 24 horas. Con el objeto de complementar esta validación cruzada, se calcularon 7800 puntos para generar una malla con la formulación propuesta de un variograma afectado por el parámetro alfa. Los resultados se muestran en la Figura 9.

## CONCLUSIONES

Se llevó a cabo una caracterización geoestadística de la precipitación diaria acumulada para 2013, 2014 y 2015 en la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro. Empleando variogramas direccionales, distancia entre estaciones y un esquema de anisotropía, se obtuvieron las direcciones de máxima variabilidad por meses y por años. El empleo del concepto de anisotropía permitió ejemplificar la correcta selección de los variogramas direccionales, que adicionalmente a un parámetro de proporcionalidad, pueden emplearse para la interpolación espacial y la cartografía de campos de lluvia en tiempo real. Los resultados muestran que existen meses de mayor variabilidad dentro de un mismo año y que la lámina de precipitación tiene una correlación directa con la distancia entre estaciones.

El estudio de la anisotropía en el monitoreo de las precipitaciones en una zona urbana es de gran

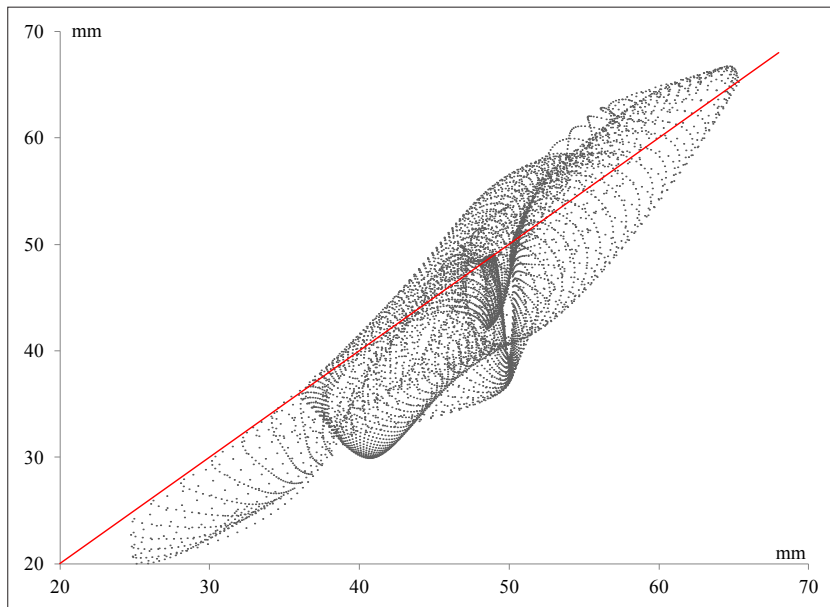


Figura 9. Validación cruzada de las láminas acumuladas en 24 horas (mm) de la tormenta del 18 de agosto 2014 sobre la zona metropolitana de Querétaro, considerando una interpolación con Kriging afectada por un variograma direccional y el parámetro  $\alpha$ . Fuente: elaboración propia.

importancia pues la altura de las construcciones (macro rugosidad), el desarrollo urbano, las islas de calor y el constante cambio de uso del suelo, inducen un cambio en el comportamiento del patrón de las precipitaciones (Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre y Wyseure, 2006). Del análisis de anisotropía se concluye que para los cuatro meses más lluviosos del año, la ecuación de anisotropía (variograma teórico) presenta un rango que tiende a ser igual a la distancia (h), a la cual sucede la máxima variabilidad de la precipitación. Por el contrario, para las láminas mensuales acumuladas en una estación, los valores muy cercanos a la media mensual provocan que el valor del rango en el variograma teórico tienda a alejarse del valor (h), donde sucede la máxima variabilidad de las mediciones. Observando estos resultados se concluye que, cuando existe una mayor precipitación, la variabilidad se puede calcular en una distancia (h) menor a 3.67 kilómetros.

Lo anterior permite introducir una constante que afecte al variograma, de tal forma que un parámetro  $\alpha$  directamente proporcional al rango. La cartografía de isoyetas afectadas por variables climáticas a manera de un co-Kriging es recomendable para la cuantificación de eventos monitoreados a tiempo real. Como se mencionó, las autoridades

locales de Protección Civil utilizan una herramienta de hidro-informática para conocer eventos en tiempo real (cada minuto) en sitios en donde no se tienen instaladas estaciones climatológicas. Monitorear a cada minuto no es una tarea fácil, pero debe hacerse cuando se trata de sistemas de alerta (Haberlandt, 2007). La herramienta tiene incorporado un semáforo de alerta para intensidades instantáneas y precipitación acumulada. Este semáforo detona los protocolos de las autoridades, por lo que un pequeño rango de variación en las precipitaciones interpoladas puede ser motivo para movilizar a no al personal operativo. Por ejemplo, el rango para la carga de combustible y equipamiento de vehículos se detona a los 65 mm de precipitación acumulada. Si la interpolación espacial se hiciera de la manera tradicional con Kriging y un variograma lineal, atender una emergencia en la zona de San José el Alto, según la Figura 7 (56 mm) no se daría la alerta a la acción. Sin embargo, con el cálculo de la precipitación con un variograma direccional con anisotropía, según la Figura 8, si sería necesario detonar el protocolo, pues la zona de San José el Alto está en el rango de 60 mm. Si bien esto es solo un ejemplo, se debe reflexionar sobre la importancia que tiene la interpolación espacial a tiempo real en un sistema de alerta temprana en una zona urbana.

## REFERENCIAS

- Adhikary, S., Muttill, N. y Yilmaz, A. (2016). Genetic Programming-Based Ordinary Kriging for Spatial Interpolation of Rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2), 04015062. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001300](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001300)
- Aguiar, E., Pastor, D., Vázquez, A. e Ibarra, D. (2018). Recolección de datos meteorológicos en tiempo real mediante el uso de funciones asíncronas non-blocking. *Revista NTHE*, 24, 113-117.
- Asa, E., Saafi, M., Membah, J. y Billa, A. (2012). Comparison of Linear and Nonlinear Kriging Methods for Characterization and Interpolation of Soil Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(1), 11-18. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000118](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000118)
- Bravo-Cabrera, J., Azpra-Romero, E., Rodríguez-Gonzalez, F. y Rodríguez-López, O. (2018). Effects of ENSO on precipitation in Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 97. <http://dx.doi.org/10.14350/ig.59679>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. y Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413-421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Campling, P., Gobin, A. y Feyen, J. (2001). Temporal and spatial rainfall analysis across a humid tropical catchment. *Hydrological Processes*, 15(3), 359-375. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.98>
- Carrera-Hernández, J. y Gaskin, S. (2007). Spatio-temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 231-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.021>
- Chou, Y. (2010). Map Resolution and Spatial Autocorrelation. *Geographical Analysis*, 23(3), 228-246. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.1991.tb00236.x>
- CONAGUA (2016). Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subdirección General de Planeación. *Atlas del Agua en México*. CONAGUA: Ciudad de México.
- Creutin, J. y Obled, C. (1982). Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resources Research*, 18(2), 413-431. <http://dx.doi.org/10.1029/wr018i002p00413>
- Delhomme, J. P. (1978). Kriging in the Hydrosociences. *Advances in Water Resources*, 5, 251-266. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(78\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0309-1708(78)90039-8)
- Duan, L., Zheng, J., Li, W., Liu, T. y Luo, Y. (2017). Multivariate properties of extreme precipitation events in the Pearl River basin, China: Magnitude, frequency, timing, and related causes. *Hydrological Processes*, 31(21), 3662-3671. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.11286>
- Dubois, G., Malczewski, J. y Cort, M.D. (Eds.), (1998). Spatial Interpolation Comparison 97. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2 (1-2), Special Issue.
- Fortanell, M., Bravo, F., Albuquerque, N. y Sosa, R. (2014). Análisis de precipitación mensual del verano de 2013 en la ciudad de Querétaro. Red universitaria de caracterización de riesgos Hidrometeorológicos, fluviales y costeros. *Revista Nthe*. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, 14, 45-49.
- García-Arróliga, N., Méndez-Estrada, K., Reyes-Rodríguez, R. y Marin-Cambranis, R. (2013). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en 2013*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación.
- Gil, S., Ramírez, G., Muñoz, M. y González S. (2018). Implementación de un modelo de datos para el almacenamiento de información climatológica en el estado de Querétaro. *Revista NTHE*, 24, 16-19.
- Golian, S., Saghafian, B., Elmi, M. y Maknoon, R. (2011). Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation (or dependence). *Hydrological Processes*, 25(13), 2046-2055. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7956>
- González-Villarreal, F., Domínguez-Mares M. y Arriaga-Medina, J. (2013). Impactos del huracán "Ingrid" y la tormenta tropical "Manuel" en territorio mexicano. *Boletines Instituto de Ingeniería, UNAM*. Recuperado de [www.agua.unam.mx/boletines/pdfs/ingridmanuel\\_oct13.pdf](http://www.agua.unam.mx/boletines/pdfs/ingridmanuel_oct13.pdf)
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 113-129. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X)
- Gutiérrez, J., Vargas, V., Romero, M., Plácido de la Cruz, J., Aguirre, M. y Silva, H. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 76, 20-33.
- Gutiérrez-López, A., Lebel, T., Ruíz, I., Descroix, L. y Duhne, M. (2015). Prediction of hydrological risk for sustainable use of water in Northern Mexico. En S. Setegn y M. Donoso, *Sustainability of Integrated Water Resources Management* (pp. 245-271). Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-12194-9>
- Gutiérrez-Oliva, J., Estrada, C., Morales, A. y Castillo, A. (2018). Herramienta web para calcular valores

- meteorológicos utilizando algoritmos de interpolación espacial. *Revista NTHE*, 24, 122-126.
- Haberlandt, U. (2007). Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 144-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.028>
- Haining, R. (2003). *Spatial data analysis, theory and practice*. Cambridge University Press.
- Hoover, K. y Wolman, M. (2005). Beyond the semivariogram: Patterns, scale, and hydrology in a semi-arid landscape. *Advances in Water Resources*, 28(9), 885-898. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.02.006>
- Jimenez-Cisneros, B. (2015). Seguridad hídrica: retos y respuestas, la fase VIII del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2014-2021). *Revista Aqua-LAC*, 7(1), 20-27.
- Kebaili-Bargaoui, Z. y Chebbi, A. (2009). Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatio-temporal rainfall. *Journal of Hydrology*, 365(1-2), 56-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.025>
- Lin, G. y Chen, L. (2004). A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model. *Journal of Hydrology*, 288(3-4), 288-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.10.008>
- Lloyd, C. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 128-150. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.026>
- Löwe, R., Urich, C., Sto. Domingo, N., Mark, O., Deletic, A. y Arnbjerg-Nielsen, K. (2017). Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations – A new generation of urban planning tools. *Journal of Hydrology*, 550, 355-367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.009>
- Méndez J., Nívar, J. y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 65, 38-55.
- Méndez-Venegas, J., Herrera, G., Díaz-Viera, M. y Valdés-Manzanilla, A. (2013). Geostatistical simulation of spatial variability of convective storms in Mexico City Valley. *Geofísica Internacional*, 52(2), 111-120. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7169\(13\)71466-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7169(13)71466-1)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2019). Oceanic Niño Index (ONI). [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). [Acceso: 6/03/2019]
- Pérez, J., Maderey, L., Pereyra, D. y Filobello U. (2012). Estimación de la creciente de diseño utilizando el hidrograma unitario instantáneo: el caso de la Cuenca del río Tecolutla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 79, 20-38.
- Pérez-Morales, A., Gil-Guirado, S. y Olcina, J. (2016). La información catastral como herramienta para el análisis de la exposición al peligro de inundaciones en el litoral mediterráneo español. *EURE Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, 42(127), 231-256. <http://dx.doi.org/10.4067/s0250-71612016000300010>
- Rysman, J., Verrier, S., Lemaître, Y. y Moreau, E. (2013). Space-time variability of the rainfall over the western Mediterranean region: A statistical analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8448-8459. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50656>
- Samper C. y Carrera R. (1996). *Geoadística: aplicaciones a la hidrogeología subterránea* (2a ed.). Barcelona, España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Schlünzen, K., Hoffmann, P., Rosenhagen, G. y Riecke, W. (2009). Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology*, 30(8), 1121-1136. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1968>
- SEDATU. (2013, 16 de diciembre). Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. *Programa Sectorial de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano 2013-2018*. Diario Oficial (Segunda Sección). México: Secretaría de Gobernación.
- Sideris, I., Gabella, M., Erdin, R. y Germann, U. (2013). Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680), 1097-1111. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2188>
- Tarawneh, Q. y Şen, Z. (2011). Spatial climate variation pattern and regional prediction of rainfall in Jordan. *Water and Environment Journal*, 26(2), 252-260. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00284.x>
- Teegavarapu, R. y Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 191-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>
- Toscana, A., Campos, M. y Monroy J. (2010). Inundaciones, protección civil y habitantes de San Mateo Atenco, Estado de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 72, 68-81.

- Vera, M. y López, J. (2010). Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 73, 22-40.
- Zhao, L., Xiao, H., Zhou, M., Cheng, G., Wang, L., Yin, L. y Ren, J. (2011). Factors controlling spatial and seasonal distributions of precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in China. *Hydrological Processes*, 26(1), 143-152. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8118>