

CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE REDES PLUVIOGRÁFICAS: CASO DE LA CUENCA DE LA PRESA PEÑITAS

• René Lobato-Sánchez •
Servicio Meteorológico Nacional, México

• Francisco Javier Aparicio-Mijares • Marco Antonio Sosa-Chiñas •
• Indalecio Mendoza-Urbe •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Se presenta una metodología para determinar la importancia relativa de la ubicación de una estación pluviométrica dentro de una red meteorológica o climatológica ya existente. Lo anterior a partir del análisis del error medido a través de su varianza explicada y de un análisis espacial, en donde se considera cada estación. Tomando como referencia base la información contenida por la totalidad de las estaciones dentro de la red, se determina la importancia relativa de cada una de ellas a través del error asociado derivado de su no inclusión. El análisis se realiza mediante la conformación de una malla regularmente espaciada obtenida mediante el esquema de interpolación espacial denominado "Kriging con regresión", el cual resultó ser la mejor aproximación cuando se trata de incorporar una variable que permita mejorar la estimación espacial en topografías complejas, como es el caso de la cuenca de la presa Peñitas. Mientras mayor sea la diferencia con respecto a la malla de referencia, mayor será su importancia dentro de la red, utilizando para ello la medida del error a través de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre estas dos mallas. El análisis determina que, en esta cuenca, dependiendo de la temporada (invierno o verano), la importancia de cada estación es diferente; únicamente la estación de Ocotepc mostró que sus observaciones son muy importantes en ambos periodos. Esta metodología es útil cuando se requiere aumentar el número de estaciones pluviométricas, pues ayuda a determinar los sitios donde se espera que las observaciones sean representativas del entorno.

Palabras clave: redes meteorológicas, interpolación espacial con Kriging con regresión, lluvia por cuencas, análisis de error, bases de datos climatológicos.

Introducción

Una red hidrológica de datos es un grupo de instrumentos, instalaciones y actividades de recolección de datos, diseñado y operado para responder un objetivo individual o un conjunto de objetivos compatibles. Frecuentemente, los objetivos se asocian con un uso particular, que se anticipa para los datos recolectados en la red. El término "red" se usa frecuentemente en un sentido menos riguroso. Es común oír hablar de redes de agua superficial, de precipitación, etcétera, en referencia a una agregación de esta-

ciones que no tienen coherencia en sus objetivos. Los datos recolectados en sitios incluidos en esta última definición pueden incluso tener diferentes usos, y esta disparidad puede causar confusiones y falsas expectativas (World Meteorological Organization, 2008).

Con frecuencia, las redes de estaciones pluviográficas se construyen tomando en cuenta factores tales como accesibilidad, seguridad y costos, es decir, usando consideraciones diferentes de los fenómenos que se pretende medir. Del mismo modo, con frecuencia se producen cambios significativos en el número

y la ubicación de las estaciones por razones administrativas o de beneficio-costos, lo que puede modificar en forma importante el diseño de las redes, aun cuando éste haya sido realizado de acuerdo con criterios apropiados para sus objetivos. Sin embargo, no siempre es posible diseñar o rediseñar redes de estaciones pluviográficas, pues, por una parte, los costos de ello pueden ser prohibitivos y, por otra, la información histórica de estaciones específicas puede ser determinante en análisis estadísticos, por lo que mover o desactivar una estación puede tener desventajas importantes. Así, resulta necesario con frecuencia determinar si la distribución espacial de las redes de estaciones pluviométricas o de otro tipo representa adecuadamente el objetivo o los objetivos para los que se usa. A esto se le llamará “caracterización espacial de redes”.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (World Meteorological Organization, 2008), los pasos que se deben seguir para revisar y rediseñar una red hidrológica existente son los siguientes: arreglo institucional, objetivos de la red, establecimiento de prioridades, diseño de la red, operación y mantenimiento, presupuesto, implementación y operación. La revisión debe hacerse periódicamente, para aprovechar la reducción en incertidumbre hidrológica lograda por la adición de datos desde la última revisión y para adaptar la red a los cambios en el ambiente socioeconómico que

hayan ocurrido. Las recomendaciones de la OMM indican las densidades de estaciones de registro de precipitación mostradas en el cuadro 1. En México, la densidad media de estaciones es de aproximadamente 662 km² por estación (Comisión Nacional del Agua, 2007). La gran mayoría de estas estaciones son convencionales (no automáticas), y, considerando la accidentada topografía del país, esta cifra es notablemente superior a la de 250 recomendadas por la OMM para regiones montañosas. De ahí la necesidad de contar con redes que respondan eficientemente a los fines para los que se establecieron.

Se ha publicado un cierto número de trabajos relacionados con el diseño, revisión y optimización de redes de estaciones pluviométricas. Por ejemplo, Vilchis-Francés *et al.* (2009), con base en los criterios de densidad de estaciones de la OMM antes mencionados, utilizaron un criterio de interpolación de Kriging dentro del sistema de información geográfica *IDRISI* para proponer una configuración de la red pluviométrica en el Estado de México. Collado y Toledo (1997) propusieron un procedimiento para la ubicación óptima de cuatrocientas estaciones climatológicas automáticas y diez observatorios meteorológicos en la república mexicana, que formarían parte de las redes hidrológicas con transmisión vía satélite en todo el país; identificaron la Función de Covarianza Generalizada para 156 cuencas principales, y usaron el método Kriging para

Cuadro 1. Recomendaciones de densidad de estaciones pluviográficas de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, 2008).

Unidad fisiográfica	Precipitación	
	Convencionales	Automáticas
Costa	900	9 000
Montañas	250	2 500
Planicie interior	575	5 750
Ondulado	575	5 750
Pequeñas islas	25	250
Áreas urbanas	--	10-20
Polar árido	10 000	100 000

interpolan la altura de lluvia y estiman la precipitación media en una cuenca o región hidrológica. La información que se obtendría de esta red serviría para propósitos múltiples: emergencias hidrometeorológicas, actividades agrometeorológicas, pronósticos del clima en centros turísticos y planeación hidráulica nacional.

En este artículo se presenta una metodología para determinar la importancia relativa de las estaciones pluviométricas, en función del error incurrido al no contar con su información. Se considera únicamente la precipitación, por ser ésta la variable imprescindible y que se reporta en todas las estaciones, además de ser la de mayor importancia para estudios hidrológicos. Con el fin de estudiar el efecto bajo distintas condiciones, se usaron dos periodos estacionales: verano e invierno. En el primer periodo se consideraron los meses de mayo a octubre, y en él tienen importancia las tormentas convectivas y sistemas de mesoescala. En el segundo se incluyen los meses de noviembre a abril, y en éste se aprecia el efecto de los frentes fríos o nortes con lluvia estratiforme.

Para determinar la importancia relativa de la ubicación de una estación dentro de la red, se hace la suposición de que no se hubiera contado con su información. En estas circunstancias, se obtiene una malla interpolada con la información de todas las demás estaciones. Mientras mayor sea la diferencia de esta malla respecto a la malla de referencia, se puede considerar que la importancia de contar con la estación en esta ubicación es mayor. Si la diferencia es pequeña, se puede considerar que la red no necesita una estación en esa ubicación, pues la interpolación con las demás estaciones puede estimar con confiabilidad el comportamiento local. En este estudio se consideró que la mejor medida de divergencia de las mallas es la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de los errores locales en cada nudo de la malla.

Finalmente se presenta un estudio de la mejora en la varianza al incluir una estación adicional, lo que se consigue evaluando la disminución promedio de la varianza dentro

de la cuenca, es decir, se propone una ubicación de estación, se obtiene una malla de varianza y se compara con la malla obtenida con las estaciones originales solamente, y se calcula el cambio en la varianza promedio de los nudos dentro de la cuenca. De esta forma se pueden encontrar las ubicaciones que mejorarían en mayor grado la incertidumbre.

Materiales y métodos

Breve descripción de los métodos de Kriging y razones para la selección de Kriging con regresión

El método Kriging es un estimador de funciones lineales en un campo aleatorio, que toma en cuenta la variabilidad espacial de las variables de dichas funciones a través de la covariancia, el semivariograma o la variancia generalizada de un proceso estocástico continuo $Z(x)$, a partir de realizaciones generalmente compuestas por observaciones $Z(x)$. Kriging tiene las propiedades de ser un estimador insesgado y de ser óptimo respecto a la variancia de estimación (Kitadinis, 1997). Este método permite estimar valores puntuales o funciones lineales del campo aleatorio en una región usando un conjunto limitado de valores puntuales. Adicionalmente, provee una medida de la precisión de los valores estimados, lo que permite diseñar redes de medición (Collado, 1988; Herrera-Zamarrón, 2000).

Aunque este método tuvo su origen en la minería (Krige, 1966), su uso se ha extendido considerablemente a diversas esferas científicas, en particular a la hidrología y la climatología (Volpi y Gambolati, 1978; Delhomme, 1978). Collado (1988) usó el método para la estimación óptima de la precipitación media; Cisneros *et al.* (2001), lo aplicaron para construir campos de tormenta en la ciudad de México; Mendoza-Cázares y Herrera-Zamarrón (2007, 2010) lo han usado para la estimación de la carga hidráulica en acuíferos, entre otras aplicaciones.

Kriging es un método de medias ponderadas, en donde los pesos asignados a los

puntos del muestreo minimizan la varianza de estimación. Esta varianza se calcula en función de un modelo de variograma y de las distancias relativas entre los puntos del muestreo. De esta manera se obtiene la mejor estimación lineal no sesgada (Issaks y Srivastava, 1989). El método se basa en la hipótesis de que la variación espacial de una variable determinada es muy irregular para ser modelada con una función matemática, pero que puede ser descrita por una superficie estocástica. De esta manera, se identifican tres componentes:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (1)$$

$m(x)$ es la componente estructural, que representa el valor medio o una tendencia claramente definida.

ε' es la componente aleatoria.

ε'' corresponde al ruido o error residual gaussiano con media cero.

La primera etapa consiste en determinar una función adecuada para definir la componente estructural, que por lo general es el valor medio. Así, la diferencia media o esperanza entre dos posiciones cualesquiera separadas por un vector h es:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] \quad (2)$$

y se puede suponer que la varianza de las diferencias dependa solamente de la distancia:

$$\begin{aligned} E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \\ = E\{[\varepsilon'(x) - \varepsilon'(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) \end{aligned} \quad (3)$$

En donde $\gamma(h)$ es la semivarianza y se obtiene con la construcción de un semivariograma con los puntos muestreados:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum \{Z_i - Z_j\}^2 \quad (4)$$

donde n es el número de combinaciones de puntos i con j , cuya separación es h . La construcción de este semivariograma puede ser isotrópico o anisotrópico, es decir, independiente o no de la dirección. Se espera que la semivarianza vaya en aumento conforme se incrementa la distancia, hasta llegar a un punto en el que tiende a un valor constante. Generalmente el semivariograma se ajusta a una función, y los tipos de curva más comunes son el lineal, el esférico, el exponencial y el gaussiano.

Las características del semivariograma son que inician normalmente en cero (aunque en algunos casos se utiliza un valor conocido como "efecto *nugget*") y tiene una tendencia al valor del techo a distancias grandes, y el umbral de autocorrelación es la distancia en la que la tendencia al valor del techo se mantiene constante. La interpolación con Kriging es un tipo de combinación ponderada de todos los n puntos del muestreo:

$$Z^* = \sum_i^n w_i Z_i \quad (5)$$

en que la suma de pesos w_i es igual a la unidad, y éstos se determinan resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} & 1 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{10} \\ c_{20} \\ \dots \\ c_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C \cdot W = D$$

donde c_{ij} es la covarianza espacial entre el punto i y el j ; c_{i0} es la covarianza espacial entre el punto i y el punto a interpolar, y μ es el multiplicador de Lagrange, que sirve para determinar la varianza del error. La covarianza espacial es una medida de la correlación espacial y se evalúa con la función del variograma para la distancia indicada. Como se puede repetir muchas veces la operación de interpolar, se acostumbra premultiplicar ambos lados por la inversa de la matriz C :

$$\begin{aligned} C^{-1} \cdot C \cdot W &= C^{-1} \cdot D \\ W &= C^{-1} \cdot D \end{aligned} \quad (7)$$

Una ventaja del método de interpolación por Kriging es el aspecto estocástico, ya que se puede determinar la varianza esperada del error en cada estimación:

$$\gamma^* = \mu + \sum_i^n w_i \gamma_i \quad (8)$$

Existen diferentes variantes del método de Kriging (Isaaks y Srivastava, 1989), dependiendo principalmente de la forma en que se modela la componente estructural, $m(x)$. En el Kriging simple se considera conocida y normalmente se toma el valor de cero. En el Kriging ordinario se considera desconocida y se establece una condición adicional al sistema de ecuaciones para filtrar el valor desconocido de la media. En el Kriging con factor externo se establece una función externa que define esta componente estructural. En el Kriging universal se considera que esta componente es una función lineal de las coordenadas. En el Kriging con regresión, la componente estructural se ajusta mediante una regresión con una o más variables adicionales. Estas últimas tres técnicas son matemáticamente similares y el nombre cambia por el tipo de variables auxiliares utilizadas, siendo el último el nombre general. También existe el método Cokriging, en el que se utiliza, además de la variable principal, una variable auxiliar de la que se tiene más densidad de observaciones y una fuerte correlación con la primera.

Con el objeto de incluir el efecto de la ubicación y del terreno sobre la distribución de la precipitación, se consideró el uso de los métodos de Kriging con regresión y Cokriging. Rossiter (2007) recomienda que si ambas variables están co-localizadas (representan observaciones en el mismo sitio), además de que se conoce la variable auxiliar en los puntos en donde se desea predecir (interpolación), es preferible utilizar técnicas más adecuadas que Cokriging, como es Kriging con regresión, Kriging con factor externo o Kriging universal. Por otra parte,

la práctica en muchas aplicaciones similares muestra una ventaja del Kriging con regresión respecto al Cokriging, como lo reportan Eldeiry y García (2009), Prudhomme y Reed (1999) y Pesquer *et al.* (2007).

Con base en estas consideraciones, se empleó el método de Kriging con regresión, utilizando como variables auxiliares las coordenadas geográficas y la altitud sobre el nivel del mar. La malla obtenida de esta manera se considera la de referencia o "completa".

Información utilizada

La información que se utilizó corresponde a la red de estaciones meteorológicas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicadas en la cuenca del río Grijalva, localizado en el sureste de México (figura 1), que es aprovechado hidroeléctricamente por medio de cuatro vasos de almacenamiento que alimentan a sendas centrales hidroeléctricas: Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas (figura 2). Esta red se utiliza por dicho organismo para la toma de decisiones en la operación del sistema hidroeléctrico. En este trabajo se usó dicha red sin tomar en cuenta las correspondientes a otros organismos, como la Comisión Nacional del Agua (Conagua), debido a que la CFE sólo tiene el control en la misma. Estas centrales representan el 55% de la energía hidroeléctrica del país (Hernández, 2000) y satisfacen el 10% de la demanda eléctrica nacional (Rubio, 2000). La presa Peñitas es la que se ubica más aguas abajo del sistema y por tanto juega un papel importante en el control de las inundaciones de la planicie tabasqueña, en donde se encuentran diversas poblaciones, la más importante de las cuales es Villahermosa (Aparicio *et al.*, 2009). Por ejemplo, esta presa fue clave para aminorar los efectos de las lluvias extraordinarias que dieron lugar a las inundaciones de 2007 (Aparicio *et al.*, 2009). El cuadro 2 resume las estaciones meteorológicas automáticas de las que se cuenta con información en la cuenca. Con la finalidad de tener información continua y en todas sus estaciones, se descargó la información desde

diciembre de 2007 (cuando estaban instaladas las diez estaciones actualmente operativas) hasta septiembre de 2009 (el mes anterior al momento de iniciar el estudio). La información pluviométrica se usó en su estado original. No se realizó ningún análisis en cuanto a su calidad o consistencia, debido a que el objetivo fue sólo determinar la importancia relativa de las estaciones pluviométricas en función del error incurrido al no contar con su información y no juzgar la calidad de la información. Por la misma razón, no se hicieron consideraciones

sobre el nivel de precisión de la red. Una vez filtrada la información, se procedió a realizar acumulaciones diarias. Las lluvias más intensas se presentan con mayor frecuencia en la tarde y noche, mientras que en la madrugada y en la mañana, las precipitaciones son menos frecuentes y con menor intensidad, como lo ejemplifica la figura 3, en donde se presenta el patrón de precipitación horaria para la estación de Ocotepec durante 2008. La figura 4 muestra el porcentaje de utilización al variar la tolerancia de huecos de información. En ella se

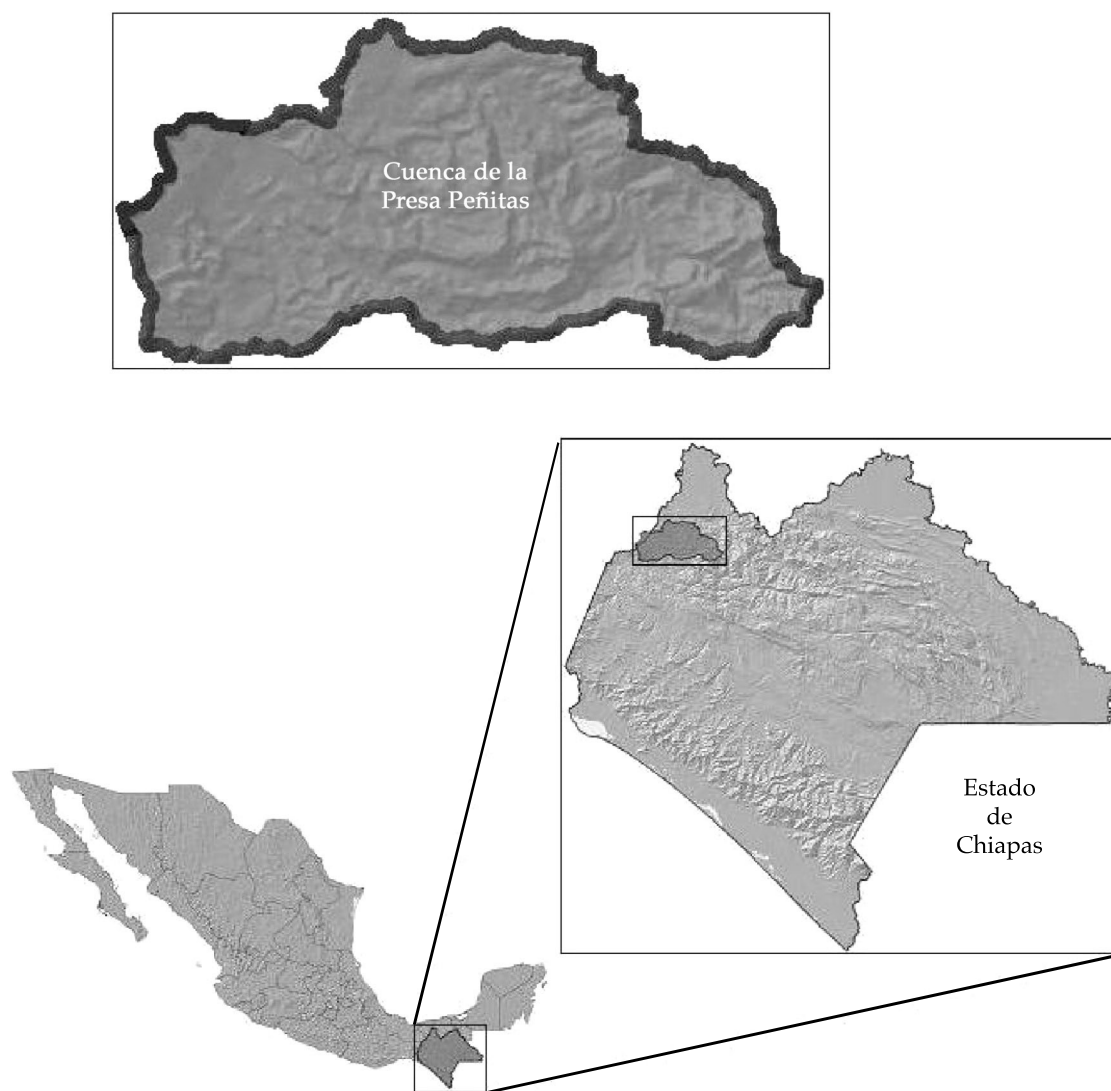


Figura 1. Ubicación de la cuenca de la presa Peñitas.

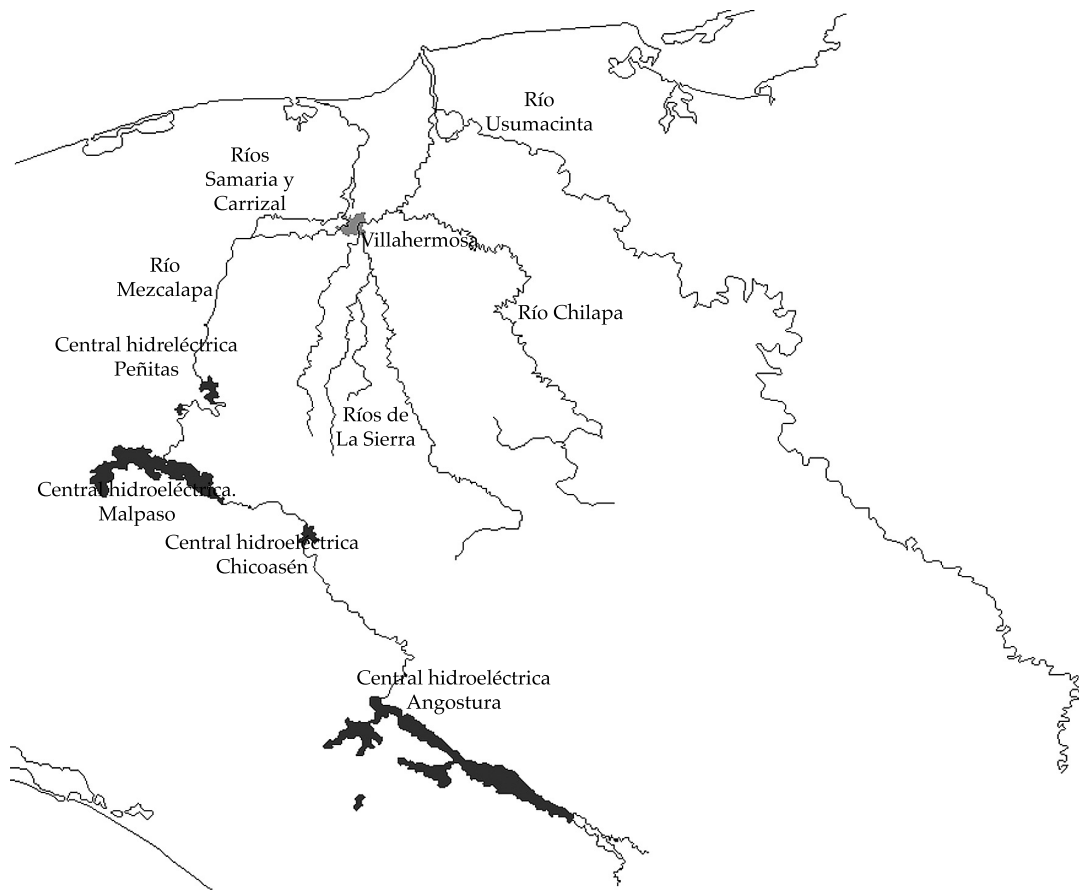


Figura 2. Sistema de ríos Grijalva.

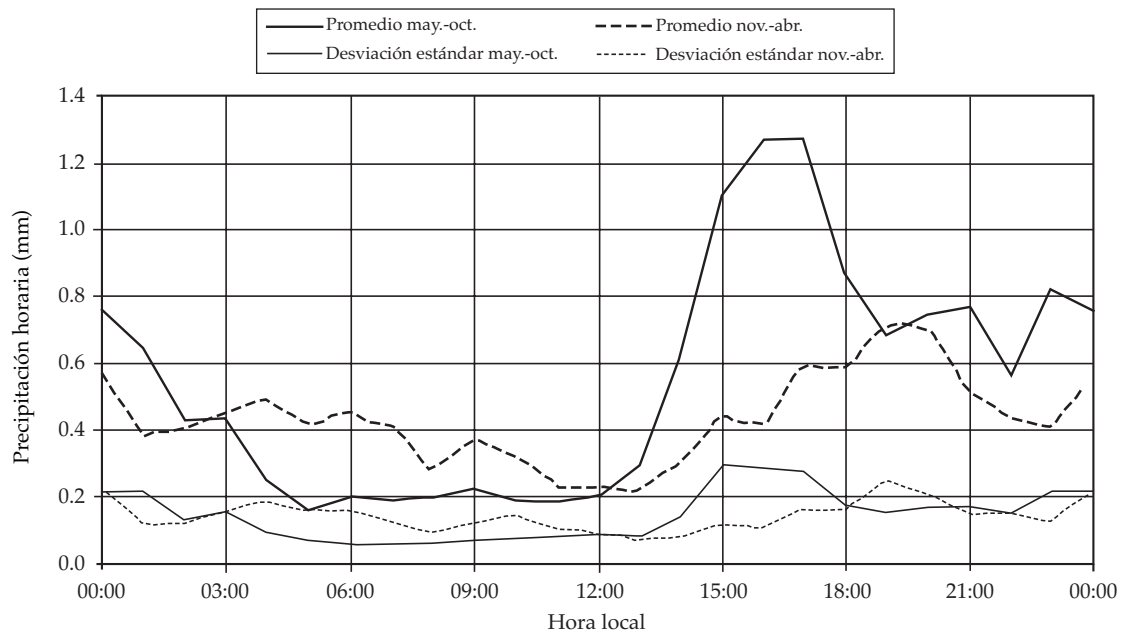


Figura 3. Patrón de precipitación diaria en la estación de Ocoatepec durante 2008.

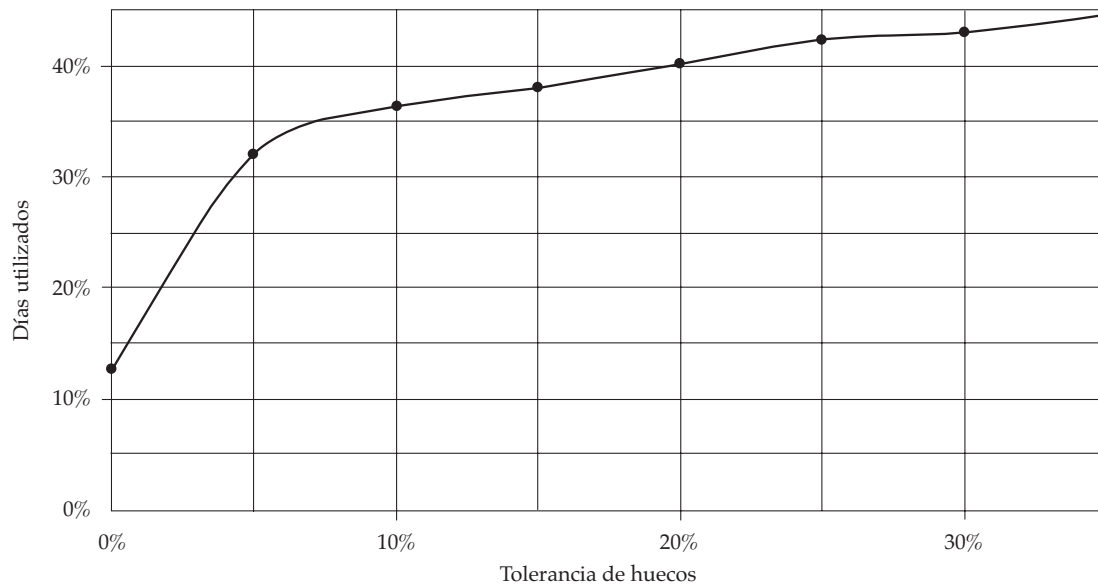


Figura 4. Utilización de información en relación con la tolerancia de huecos de información.

Cuadro 2. Estaciones automáticas en la cuenca de Peñitas.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m sobre el nivel medio del mar)	Información utilizada (precipitación)	
				Inicio (fecha/hora)	Fin (fecha/hora)
Aza-Pac	17°15'13"	93°25'38"	* 226	03/12/2007 15:00	01/09/2009 00:00
Emiliano Zapata	17°13'00"	93°20'32"	350	01/01/2008 01:00	30/09/2009 23:00
Juan de Grijalva, vaso inferior	17°22'35"	93°23'24"	* 94	14/12/2007 19:30	30/09/2009 19:00
Juan de Grijalva, vaso superior	17°21'51"	93°22'53"	* 107	06/12/2007 19:00	21/09/2009 14:00
Malpaso	17°11'58"	93°36'17"	192	01/12/2007 00:00	30/09/2009 23:00
Ocoatepec	17°13'30"	93°09'35"	1 450	01/12/2007 00:00	30/09/2009 23:00
Peñitas	17°26'42"	93°27'28"	95	01/12/2007 00:00	31/08/2009 16:00
Rómulo Calzada	17°21'14"	93°33'06"	97	01/12/2007 00:00	30/09/2009 20:00
Sayula	17°24'08"	93°19'55"	* 132	01/12/2007 00:00	30/09/2009 12:00
Tzimbac	17°13'52"	* 93°24'51"	* 216	05/12/2007 18:00	30/09/2009 21:00
Canal	17°21'51"	93°22'53"		N.D.	N.D.

(*) Revisado o estimado con GoogleEarth.

aprecia que con el 10% de tolerancia, se utiliza casi la tercera parte de los días, y esto representa cuando mucho dos registros horarios. De esta forma, se utilizaron 244 acumulaciones diarias, de las cuales 121 corresponden a la temporada

de mayo a octubre, y 123 a la temporada de noviembre a abril. El cuadro 3 resume la precipitación acumulada por estación, en cada temporada, en el periodo de análisis. Cabe mencionar que estas cantidades no representan

la precipitación acumulada en un periodo continuo, y que el único propósito es hacer el estudio comparativo.

Interpolación

Con estas cantidades de precipitación acumulada se realizaron las interpolaciones correspondientes. Se seleccionó un área de estudio que cubriera con holgura la ubicación de las estaciones y la cuenca. Las características de la malla seleccionada son en longitud de -93.7° a -93.0° y en latitud de 17.1° a 17.5° , con una resolución de 0.02° .

Con base en la discusión de la sección previa, para este estudio se seleccionó la técnica Kriging con regresión, cuya variable dependiente es la precipitación acumulada en cada temporada. Por lo que corresponde a las variables auxiliares, se encontró que la precipitación tiene cierta relación con las coordenadas geográficas, mayores precipitaciones al norte y al este, así como con la elevación del terreno. Podría pensarse, por ejemplo, en otras variables auxiliares, como la distancia a la costa, pero como la cuenca es pequeña, esta relación sería muy parecida a la de la latitud. Por lo anterior, se seleccionaron tres variables auxiliares: longitud, latitud y elevación del terreno. Debido a que se cuenta

con pocos puntos, se escogió una regresión lineal. La figura 5 muestra la comparación de la precipitación acumulada registrada contra la ajustada con esta regresión en ambas temporadas, obteniendo un factor de correlación cercano a 0.85.

Para este trabajo se utilizó el programa de uso gratuito y código abierto, *gstat* (Department of Geography at Utrecht University), del cual existen archivos ejecutables compilados para Windows.

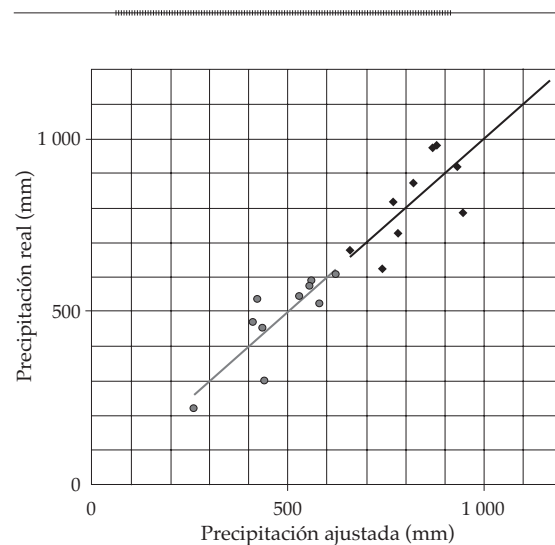


Figura 5. Ajuste con regresión múltiple.

Cuadro 3. Acumulación de precipitación por temporadas en el periodo de interés.

Estación	Precipitación acumulada (mm)		
	May-oct (121 días)	Nov-abr (123 días)	Total (244 días)
Aza-Pac	818.4	536.5	1 354.9
Emiliano Zapata	726.0	300.0	1 026.0
Juan de Grijalva, vaso inferior	981.8	590.5	1 572.3
Juan de Grijalva, vaso superior	973.5	574.0	1 547.5
Malpaso	677.5	217.9	895.4
Ocoatepec	1 181.5	542.1	1 723.6
Peñitas	785.5	522.9	1 308.4
Rómulo Calzada	870.6	454.2	1 324.8
Sayula	918.5	607.1	1 525.6
Tzimbac	622.4	469.4	1 091.8

Malla de elevaciones

Kriging con regresión requiere de una malla con las elevaciones del terreno en los nudos con las mismas características de la malla en donde se va a interpolar. La información de elevación se obtuvo de un modelo digital de elevaciones con un nudo a cada 20 m de elevación. De este modelo se localizaron los puntos individuales más próximos a cada uno de los nudos de la malla.

Adicionalmente, y con el objeto de cubrir la parte de la malla que representa el exterior de la cuenca, se localizaron varios puntos a cada 0.1° utilizando la herramienta *GoogleEarth*. De esta forma se obtuvo la malla de altitud, que tiene mayor detalle dentro de la cuenca de Peñitas. Esto no representa un inconveniente, ya que las cuantificaciones de error se llevarán a cabo solamente en el interior de la cuenca; en el exterior, la malla solamente se utilizará para seguir las tendencias de la interpolación.

Comparación de Kriging con regresión y Kriging simple

Como ejercicio para confirmar la ventaja del método de Kriging con regresión, se realizó una prueba de comparación con el Kriging simple, la cual consistió en comparar la interpolación en ambos casos, al quitar de los datos una de las estaciones, determinando el error en cada método.

Los resultados de la prueba se presentan en la figura 6, en donde se compara el error puntual en el caso de omitir cada estación con el método de Kriging simple y el Kriging con regresión. En esta figura se aprecia que en general los errores con el segundo método son menores, especialmente en la estación Emiliano Zapata, en la temporada de mayo a octubre, cosa que no sucede en la temporada de noviembre a abril, en la que el error es muy parecido, y aun ligeramente mayor. La estación Rómulo Calzada fue la única donde en ambas temporadas el error con el método de Kriging con regresión no es más eficiente.

En general, se puede hablar que en este caso, con el método de Kriging con regresión, se obtiene una mejora del orden de 10% en la temporada de mayo a octubre y de cerca de 1% en la temporada de noviembre a abril, en relación con el Kriging simple. Este efecto era de esperarse debido a que el forzamiento orográfico incrementa el efecto convectivo en la formación de las tormentas.

Resultados

Importancia relativa de las estaciones actuales

La importancia relativa de las estaciones actualmente en operación se obtiene comparando las mallas obtenidas, descartando cada una de

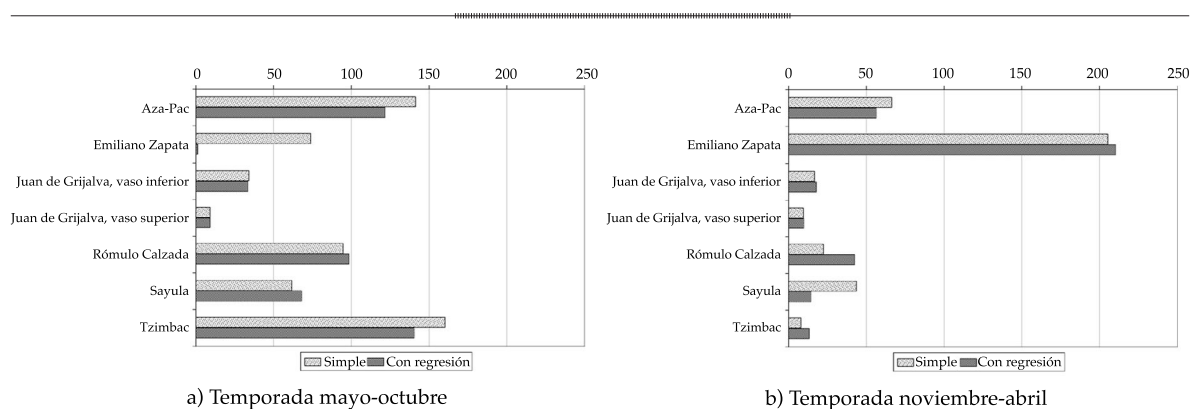


Figura 6. Comparación de los métodos de interpolación con Kriging. Error (mm) al no incluir una estación.

las estaciones en la interpolación con la malla obtenida con el total de estaciones que se denomina malla de referencia.

Utilizando el total de estaciones con la técnica de Kriging con regresión se obtiene la malla de referencia (como se muestra en la figura 7) para la temporada de mayo a octubre. El siguiente paso es obtener una malla omitiendo cada una de las estaciones (como se muestra en la figura 8) para la temporada de mayo a octubre, en la que se descartó la estación Rómulo Calzada. En esta figura se marca la estación que no se tomó en cuenta en la interpolación, Rómulo Calzada, con un rombo claro, a diferencia de las demás estaciones, identificadas con un rombo oscuro. Comparando esta malla con la de referencia, podemos apreciar que en este caso se subestima la precipitación cerca de la estación, en el noroeste de la cuenca, además de cambios menores en el este. La diferencia entre ambas mallas se muestra en la figura 9.

Aquí se comprueba que el error principalmente se presenta en el noroeste, con una subestimación que alcanza valores de 100 mm, mientras que en el este se llega a tener una ligera sobreestimación de hasta 20 mm (dentro de la cuenca). El efecto que se observa en el este de la cuenca se debe a que faltando un punto también cambia la regresión base. A partir de esta malla se puede evaluar el RMSE en los nudos que se localizan dentro de la cuenca, aunque cabe aclarar que también se incluyeron algunos que se encuentran fuera, pero muy próximos. Este proceso se repite con todas las estaciones. La figura 10 muestra el resultado para las temporadas de mayo a octubre y de noviembre a abril, respectivamente. El error puede verse también como un indicador de la importancia relativa de la estación dentro de la red.

Para una mejor apreciación, los errores se muestran en escala logarítmica, con lo que se observa que el error incurrido al descartar la

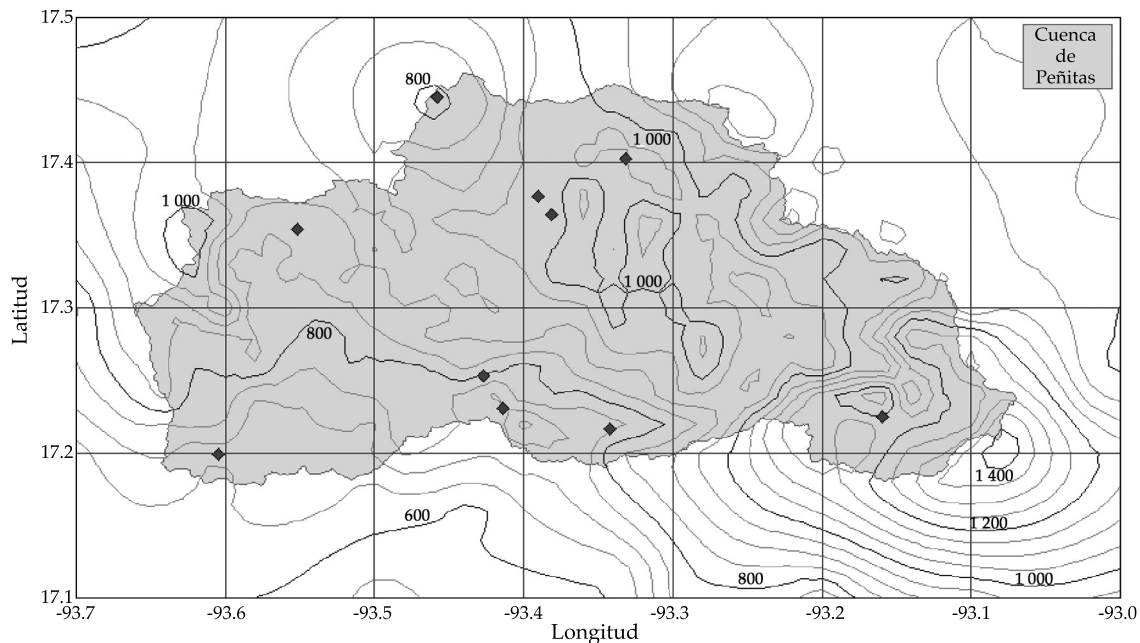


Figura 7. Malla de referencia obtenida con la totalidad de las estaciones para la temporada de mayo a octubre.
Precipitación en mm.

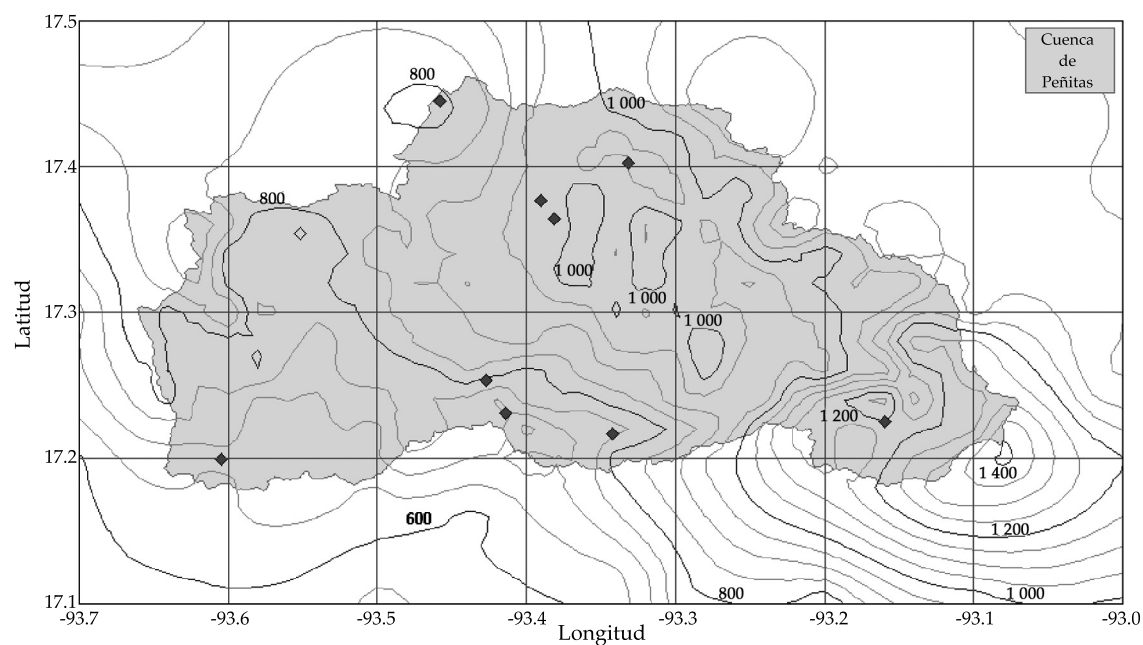


Figura 8. Malla obtenida con la interpolación de todas las estaciones, excepto la de Rómulo Calzada, para la temporada de mayo a octubre. Precipitación en mm.

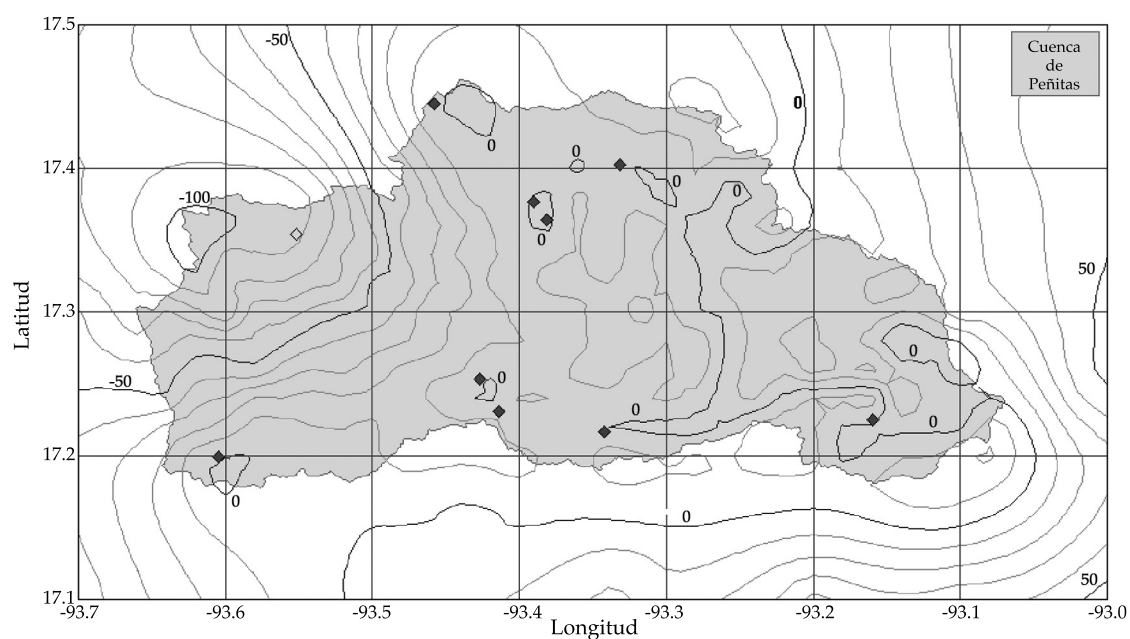


Figura 9. Error (mm) en la interpolación, al excluir la estación de Rómulo Calzada, para la temporada de mayo a octubre.

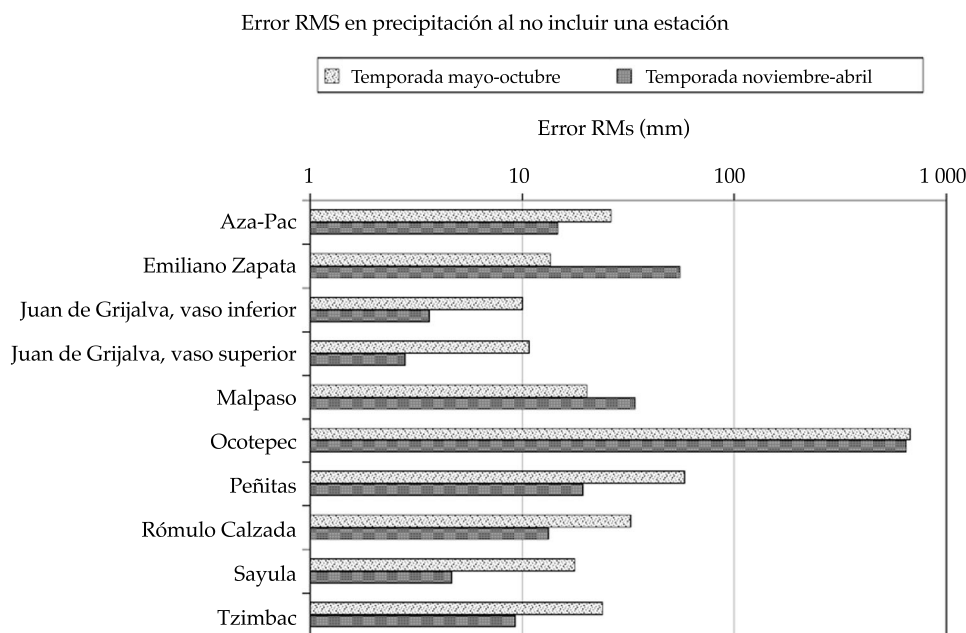


Figura 10. Importancia relativa de las estaciones durante precipitaciones en ambas temporadas.

estación Ocotepec es un orden de magnitud mayor al de las demás. Era de esperarse la importancia de esta estación, pues Ocotepec es la que acumula más precipitación en el periodo estudiado y además porque es de vital importancia en cuanto a posición geográfica, incluyendo la altitud.

Registros climatológicos históricos

Para ayudar a la toma de decisiones durante la selección de la ubicación de nuevas estaciones, es necesario considerar registros históricos de otras estaciones que cuenten con la mayor información posible. Para ello se tomaron los promedios históricos de las estaciones climatológicas contenidas en la base de datos nacional CLICOM. Se utilizó la versión 2.1 del ERIC III para recuperar esta información (Lobato et al., 2009). Se realizó un proceso de filtrado para utilizar solamente estaciones con diez o más años de información. Los campos de precipitación se obtuvieron acumulando la

precipitación promedio mensual para cada uno de los dos periodos.

Con el mismo método de interpolación mencionado anteriormente, Kriging con regresión, se obtienen dos mallas con características similares a las que se han venido presentando en este trabajo, pero ahora con la precipitación promedio histórica, una por cada temporada. Las figuras 11 y 12 muestran estas mallas y en ellas se muestran las posiciones de las estaciones de CLICOM que fueron utilizadas. En ambas figuras se aprecia un patrón común en cuanto a las precipitaciones históricas dentro de la cuenca de interés. Las precipitaciones van de valores más bajos en el sur de la cuenca, especialmente hacia Malpaso, y se van incrementando hacia el norte, en particular hacia el noreste.

Mejoras a la red con una estación

Una de las ventajas de realizar la interpolación con los métodos de Kriging es que se puede

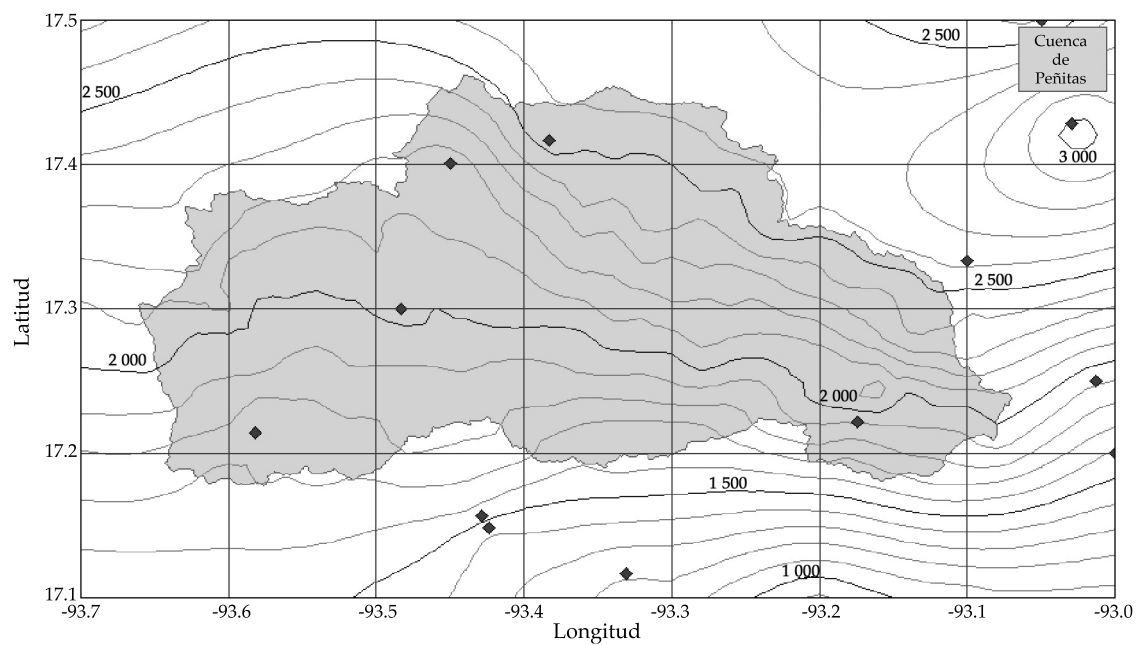


Figura 11. Precipitación (mm) histórica en la temporada mayo-octubre.

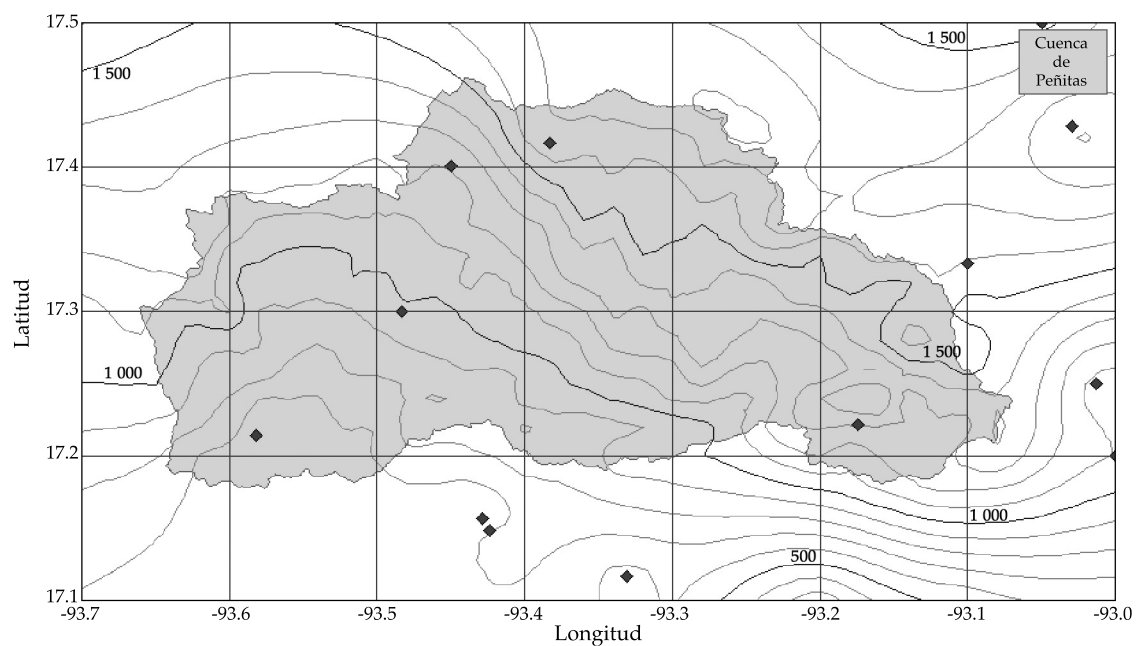


Figura 12. Precipitación histórica (mm) en la temporada noviembre-abril.

contar con un estimado de la varianza de la misma interpolación, además del aspecto estocástico, pues la varianza es un indicativo de la incertidumbre de la estimación. La varianza se obtiene utilizando el semivariograma. En este trabajo se utilizó la distribución esférica, cuya forma básica es que inicia en cero para distancias cero y se va incrementando al crecer la distancia, hasta tomar un valor fijo. La figura 13 muestra la varianza para la malla de referencia, es decir, con todas las estaciones originales, identificadas con un rombo oscuro. Si a las estaciones originales se agrega una adicional, que representaría un candidato a localización de estación, se obtendría una distribución de varianza con alguna mejora, puesto que se está cubriendo un área adicional. La figura 14 muestra el resultado de insertar una estación en las coordenadas $(-93.28^\circ, 17.34^\circ)$, que se muestra con un marcador cuadrado claro. Comparando esta malla con la de referencia, se tiene la mejoría en varianza al incluir dicho punto, como se muestra en la figura 15.

Evaluando el beneficio promedio en relación con la malla de referencia, para cada uno de los nudos se pueden encontrar las zonas en donde el beneficio es mayor. El cálculo de la varianza promedio se realiza únicamente en los nudos que están dentro de la cuenca. El resultado de este procedimiento en todos los nudos se presenta en la figura 16, en donde el beneficio se muestra como porcentaje de la varianza promedio en la malla de referencia. En esta figura vemos que la ubicación en donde más falta hace una estación es entre las estaciones de Ocotepec y Sayula, alcanzando a reducir hasta un 12% la varianza promedio. Por otra parte, en el área entre las estaciones de Malpaso, Rómulo Calzada y Aza-Pac, también sería útil una estación adicional, aunque la reducción en la varianza en este caso sería de 6%.

Conclusiones

El diseño de redes pluviográficas debe realizarse tomando en cuenta los fenómenos que se

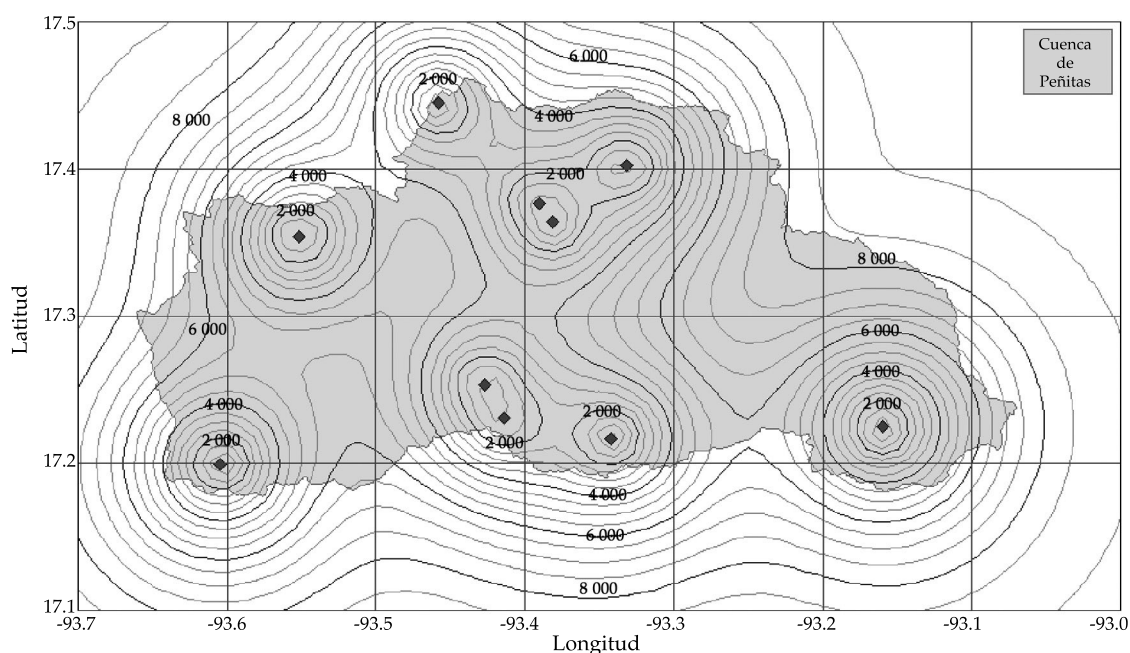


Figura 13. Varianza esperada para la malla de referencia.

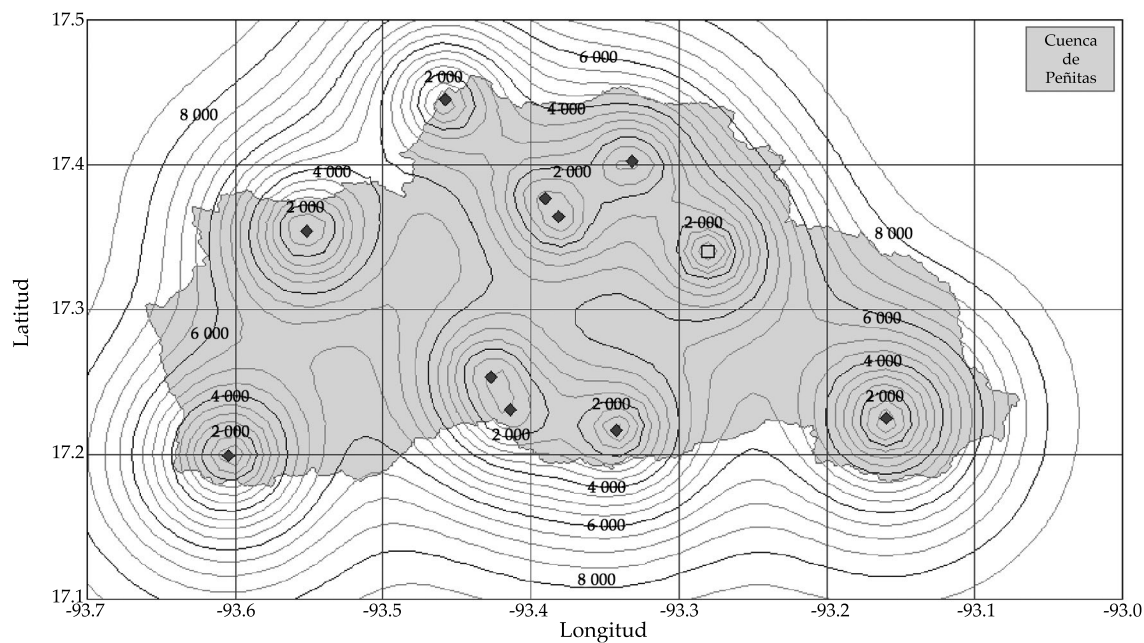


Figura 14. Varianza esperada agregando una estación en -93.28° , 17.34° .

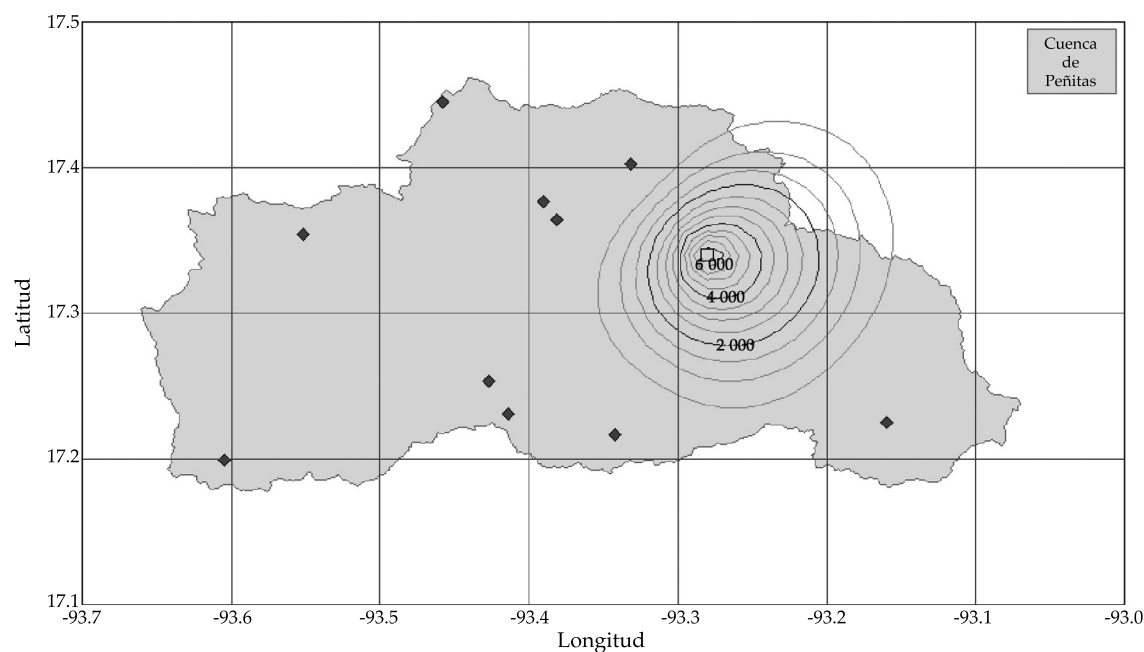


Figura 15. Mejoría en la varianza al agregar una estación en -93.28° , 17.34° .

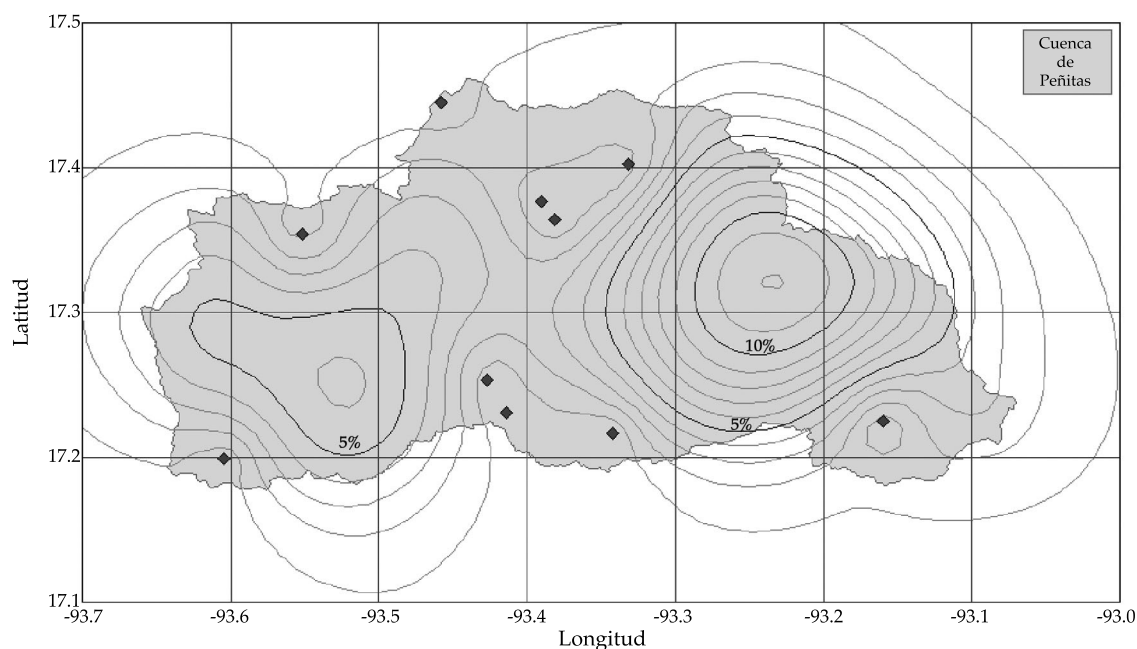


Figura 16. Mejoría en la varianza promedio al incluir una estación, como porcentaje de la varianza promedio original.

requiere medir, y no sólo los aspectos logísticos. Las redes deben revisarse periódicamente y adecuarse a las nuevas circunstancias que se presenten. Para ello es necesario caracterizarlas como se ha hecho en este trabajo. Con estos métodos es posible estimar valores puntuales o funciones lineales del campo aleatorias en una región mediante un conjunto limitado de valores irregularmente espaciados. Adicionalmente, provee una medida de la precisión de los valores estimados, lo que permite diseñar redes de medición.

En cuanto a la aplicación a la cuenca de la presa Peñitas se tiene lo siguiente: la estación con mayor importancia es Ocotepéc en ambas temporadas; las estaciones Malpaso y Emiliano Zapata cobran mayor importancia en las lluvias de invierno; las dos estaciones de Juan de Grijalva, superior e inferior, podrían considerarse como redundantes desde el punto de vista de precipitación, al estar muy próximas. Sin embargo, si el motivo principal de la ubicación de estas

estaciones se debe a cuestiones hidrométricas, no es conveniente su reubicación; la zona en donde más falta hace una estación es entre las estaciones Ocotepéc y Sayula, al sur del volcán Chichonal. En especial, tomado en cuenta los registros históricos, sería más conveniente ubicarlas cerca del parteaguas de la cuenca; en menor grado, también se podría reducir la incertidumbre de las interpolaciones si se contara con observaciones en el área entre las estaciones Malpaso, Rómulo Calzada y Aza-Pac. Para mejorar las interpolaciones, en especial con el método de Kriging con regresión, sería conveniente contar con estaciones en altitudes mayores a 500 msnm, así como en la zona este de la cuenca (entre -93.3° y -93.2°) y en la franja de latitudes (entre 17.25° y 17.35°).

Agradecimientos

Este estudio fue parcialmente patrocinado por la Gerencia de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad

para el proyecto TH-0929.3 del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Recibido: 29/11/10
Aceptado: 16/06/11

Referencias

- APARICIO, J., MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F., GÜITRÓN, A., and RAMÍREZ, A.I. Floods in Tabasco, Mexico: a diagnosis and proposal for courses of action. *J. Flood Risk Management*. Vol. 2 2009, pp. 132-138.
- CISNEROS, I.H.L., BOUVIER, C. y DOMÍNGUEZ, M.R. Aplicación del método Kriging en la construcción de campos de tormenta en la ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 3, julio-septiembre de 2001, pp. 5-14.
- COLLADO, J. Estimación óptima de la precipitación media con el método Kriging. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. III, núm. 3, septiembre-diciembre de 1988, pp. 34-45.
- COLLADO, J. y TOLEDO, V. Localización óptima de estaciones climatológicas y observatorios meteorológicos en la República Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XII, núm. 1, enero-abril de 1997, pp. 47-64.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: Semarnat, 2007.
- DELHOMME, J.P. Kriging in the Hydrosocieties. *Advances in Water Resources*. Vol. 1, No. 5, 1978, pp. 251-266.
- ELDEIRY, A. and GARCIA, L. Comparison of Regression Kriging and Co-Kriging Techniques to Estimate Soil Salinity Using Landsat Images. *Proc. Hydrology Days, 2009*. Fort Collins: Colorado State University - American Geophysical Union, 2009, pp. 27-38.
- HERNÁNDEZ, T.J.A. Operación de las centrales hidroeléctricas del río Grijalva durante los meses de septiembre y octubre de 1999. *Memorias*. XVI Congreso Nacional de Hidráulica, AMH/IMTA, México, D.F., 2000, pp. 79-84.
- HERRERA-ZAMARRÓN, G. *Aplicación al acuífero del Valle de Querétaro de una metodología nueva para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea*. Informe interno. Proyecto TH-2006. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, noviembre de 2000.
- ISSAKS, E.H. and SRIVASTAVA, R.M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford: Oxford University Press Inc., 1989.
- KITADINIS, P.K. *Introduction to Geostatistics. Applications in Hydrogeology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- KRIGE, D.G. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. *Proc. Symp. On Math. Stat. and Comp. Appl. for Ore Evaluation*. Johannesburg, South Africa, 1966.
- LOBATO, R., SOSA, M.A., MENDOZA, I. y RODRÍGUEZ, O. *Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC-III v. 2.1)*. No. Reg. 03-2006-061913380900-01. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2009.
- MENDOZA-CÁZARES, E.Y. y HERRERA-ZAMARRÓN, G. Estimación espacio-temporal de la carga hidráulica utilizando el concepto de función aleatoria espacio-tiempo. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. I, núm. 2, abril-junio de 2010, pp. 87-111.
- MENDOZA-CÁZARES, E.Y. y HERRERA-ZAMARRÓN, G. Estimación multivariada espacio-tiempo de la carga hidráulica en el valle de Querétaro-Obrajuelo. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 1, enero-marzo de 2007, pp. 63-80.
- PESQUER, L., MASÓ, J. y PONS, X. Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas. *Revista de Teledetección*. Vol. 28, 2007, pp. 69-76.
- PRUDHOMME, C. and REED, D.W. Mapping Extreme Rainfall In A Mountainous Region Using Geostatistical Techniques: A Case Study In Scotland. *International Journal of Climatology*. Vol. 19, 1999, pp. 1337-1356.
- ROSSITER, D.G. *Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing*. Technical Note. Enschede, The Netherlands: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC), 2007.
- RUBIO, H. Modelo de predicción del complejo hidroeléctrico Grijalva. *Memorias*. XVI Congreso Nacional de Hidráulica, AMH/IMTA, México, 2000, pp. 103-108.
- VILCHIS-FRANCÉS, A.Y., DÍAZ DELGADO, C., KHALIDOU, M.B. y QUENTIN, E. Optimización de la red de estaciones pluviométricas del Estado de México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 1, enero-marzo de 2009, pp. 95-108.
- VOLPI, G. and GAMBOLATI, G. On the use of a main trend for the Kriging technique in hydrology. *Advances in Water Resources*. Vol. 1, No. 6, December, 1978, pp. 345-349.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Hydrological Practices*. Sixth edition. Ginebra: Pub. WMO-No. 168, 2008.

Abstract

LOBATO-SÁNCHEZ, R., APARICIO-MIJARES, F.J., SOSA-CHIÑAS, M.A. & MENDOZA-URIBE, I. Spatial characterization of raingauge networks: case study for the basin of Peñitas dam. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 1, January-March, 2012, pp. 103-121.

A methodology to determine the relative importance of the location of a raingauge station within a meteorological or climatological network is presented based upon the induced error due to insufficient coverage. This analysis is carried out based on the mean error through the explained variance in the spatial domain, in which every raingauge station is considered. The whole raingauge network is taken as a reference base and then every station is randomly removed, along with its corresponding associated error. A regular-spaced grid obtained using the standard regression-kriging is used in the analysis since it proved to be the best methodology for including two variables at the same time for highly irregular terrains, as is the case for the Peñitas Basin. The greater the difference with respect to the reference grid, the greater the importance of the station, demonstrated by the value of the root mean square error. The analysis shows that the importance of each raingauge station varies for the two seasons studied (winter and summer). For example, the raingauge station in Ocotepéc showed that its observations are important for the two periods, whereas other stations do not show the same agreement. This methodology is useful when the number of stations needs to be increased, since it helps to determine the optimum location of sites where the best spatial and local representation can be expected.

Keywords: meteorological networks, regression-kriging spatial interpolation, basin rainfall, error analysis, climatological databases.

Dirección institucional de los autores

Dr. René Lobato Sánchez

Gerente de Meteorología
Servicio Meteorológico Nacional, México
Avenida Observatorio 192, Colonia Observatorio,
Delegación Miguel Hidalgo
11860 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 2636 4600, extensión 3457
rene.lobato@conagua.gob.mx

Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares
Ing. Marco Antonio Sosa Chiñas
Lic. Indalecio Mendoza Uribe

Coordinación de Hidrología
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 329 3600
japaricio@tlaloc.imta.mx
indalecio_mendoza@tlaloc.imta.mx