

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Estudio espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona meridional de la república mexicana.
<i>Autor / Adscripción</i>	Alfonso Gutiérrez López Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Francia Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Thierry Lebel Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Francia Roberto MejíaZermeño Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(1): 57-65
<i>Fecha de publicación</i>	2005
<i>Resumen</i>	La república mexicana, con 2,000,000 km ² presenta una importante variación espacio-temporal de la precipitación. Se presenta una distribución de probabilidad de Poisson para modelar el número de eventos lluviosos (parámetro) y una distribución exponencial para modelar la lámina media de lluvia (parámetro β) por evento. Utilizando el método de Kriging se generan los mapas de dichos parámetros y se emplean los diagramas de Hovmoller para caracterizar el régimen pluviométrico. Se comprueba que estos diagramas son una valiosa herramienta de gestión, al presentar de forma clara y simple la relación entre el número de días lluviosos, su lámina media, su variación temporal y espacial, simultáneamente.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/796

Estudio espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona meridional de la república mexicana

Alfonso Gutiérrez-López

*Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Francia
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

Thierry Lebel

Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Francia

Roberto Mejía-Zermeño

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

La república mexicana, con 2,000,000 km² presenta una importante variación espacio-temporal de la precipitación. Con valores que van desde los 200 mm en el norte del país hasta los 3,000 mm en la frontera sur. Se presenta una distribución de probabilidad de Poisson para modelar el número de eventos lluviosos (parámetro λ) y una distribución exponencial para modelar la lámina media de lluvia (parámetro β) por evento. Utilizando el método de Kriging se generan los mapas de dichos parámetros y se emplean los diagramas de Hovmoller para caracterizar el régimen pluviométrico. Se comprueba que estos diagramas son una valiosa herramienta de gestión, al presentar de forma clara y simple la relación entre el número de días lluviosos, su lámina media, su variación temporal y espacial, simultáneamente. Los resultados que se presentan para la Región Hidrológica 30, zona limítrofe con Guatemala y Belice, indican que las distribuciones de probabilidad propuestas explican de una forma aceptable la variación espacio-temporal de la precipitación.

Palabras clave: *régimen de lluvia, Kriging, distribución de Poisson, distribución exponencial, diagramas de Hovmoller, regionalización hidrológica, sur de México.*

Introducción

En los últimos años, los problemas de la disponibilidad de agua han propiciado una serie de cambios en el concepto de régimen hidrológico. Esto se debe a que dicho concepto requiere adaptarse a las condiciones cambiantes del clima (Oberlin y Hubert, 1998); sin embargo, es claro que las inundaciones y sequías continúan afectando todos los continentes. Los estudios para caracterizar el régimen pluviométrico de una región se convierten en una alternativa para

conocer, de manera precisa, la disponibilidad de agua. Comúnmente, las metodologías que emplean las relaciones intensidad-duración-frecuencia (Sivapalan y Blöschl, 1998; Ferro y Porto, 1999), así como las que presentan una capacidad de desagregación espacio-temporal de la precipitación sobre una región (Foufoula-Georgiou y Lettenmaier, 1987; Bo et al., 1994) y aquellas que toman en cuenta las precipitaciones extremas, continúan siendo las mejores opciones para estimar de manera confiable el régimen de precipitación. Algunos de estos procedimientos han sido aplicados en zonas

con características especialmente difíciles para conocer el régimen pluviométrico y cuyos resultados muestran una correcta representación del fenómeno (García y Vargas, 1996; Kieffer y Bois, 1997).

El objetivo del presente trabajo es conocer el régimen pluviométrico de una región, empleando una distribución de probabilidad capaz de modelar en forma simultánea el número de días con lluvia y la lámina media de cada evento. Sin embargo, para describir la distribución espacio-temporal de las precipitaciones es necesaria una técnica para cartografiar los campos de lluvia (Blanchet, 1981; Creutin y Obled, 1982). De esta forma, un estudio de la variabilidad de la lluvia debe ser el objeto de un análisis detallado (Rodríguez *et al.*, 1984; Bruijn y Brandsma, 2000; Huber e Iroumé, 2001). En general, las precipitaciones presentan características particulares ligadas en todo momento con la topografía; por esta razón, una representación gráfica del régimen de lluvias debe tomar en cuenta la variación temporal de las precipitaciones, así como su intensidad, frecuencia y correlación con la estructura geográfica de la zona. (Humbert, 1995; (Barcelo y Coudray, 1996); y Berndtsson y Niemczynowicz, 1988). Tradicionalmente estas relaciones se reflejan en la forma de isoyetas anuales o de un evento específico (Haiden *et al.*, 1992). Sin embargo, frecuentemente se requiere información más precisa y puntual del régimen de lluvia sobre una zona específica. En este aspecto, recientemente los procedimientos geoestadísticos han demostrado una gran confiabilidad y continúan siendo los más precisos (Creutin y Obled, 1982; Lebel y Laborde, 1988; Sen Zekai y Habib, 1998; Holawe y Dutter, 1999; Goovaerts, 2000). Se plantea como segundo objetivo de este trabajo la búsqueda de una representación alternativa a los tradicionales planos de isoyetas para presentar la variación espacio-temporal del régimen pluviométrico de una región.

Se propone utilizar un modelo estocástico regional simple, cuya distribución de probabilidad tenga un número reducido de parámetros, ya que se ha demostrado que los modelos hidrológicos simples con pocos parámetros tienen la misma confiabilidad que los modelos con muchos parámetros (Le Barbé *et al.*, 2002); además, estos modelos simples son fáciles de programar. Es decir, un modelo bien estructurado puede dar resultados de buena calidad (Perrin *et al.*, 2001). Por lo tanto se ha escogido para este estudio, en la frontera sur de México, el método de Kriging como procedimiento para interpolar y cartografiar los campos de lluvia, un proceso de Poisson y la distribución exponencial para estimar el número de eventos lluviosos y la lámina de lluvia, respectivamente. Para una mejor

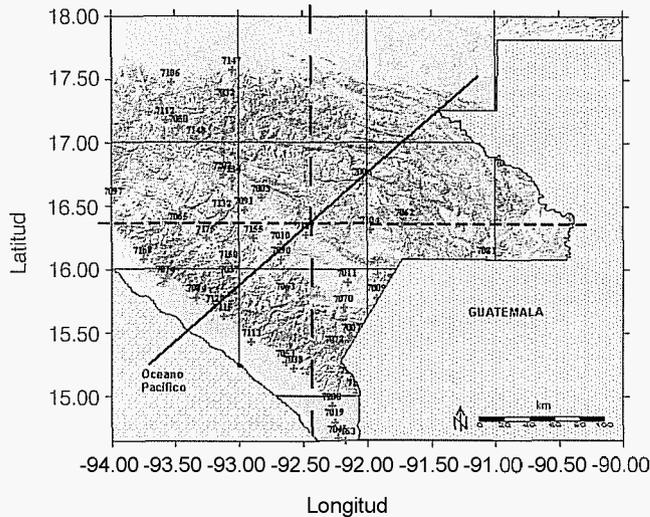
interpretación de los resultados se propone cartografiar los parámetros del modelo estocástico empleando los diagramas de Hovmoller (tradicionalmente empleados en la representación de la temperatura del mar, en función de la latitud). Estos diagramas constituyen una novedosa, clara y confiable forma para representar la distribución espacio-temporal de la precipitación.

Descripción general de la región

La república mexicana se encuentra dividida en 37 regiones hidrológicas que identifican en forma general las principales cuencas del territorio nacional. El presente estudio tiene lugar en el sureste del país y comprende en especial las regiones hidrológicas 30 y 23; estas regiones abarcan principalmente los estados de Chiapas y Tabasco, entre los meridianos 90°00' y 94°30' de longitud oeste, y los paralelos 14°30' y 18°00' de latitud norte; se extienden en una superficie aproximada de 100,000 km². Esta gran área se localiza al sur del Trópico de Cáncer e integra las regiones hidrológicas más al sur. El clima predominante es esencialmente tropical. Cabe señalar que gran parte de la variabilidad del régimen de lluvia de estas regiones se debe a la influencia del relieve; es decir, ambas regiones se encuentran abrigadas por una serie de formaciones geológicas, entre las cuales destacan la Llanura Costera del Pacífico, la Depresión Central, la Llanura Costera del Golfo, la Sierra Madre de Chiapas, el Altiplano Central y las montañas del oriente (ilustración 1). En general, las masas de aire húmedo procedentes del Golfo de México y los fenómenos extremos que provienen del océano Pacífico son los fenómenos que más las afectan. La precipitación media anual asciende a 2,000 mm, contra una precipitación media nacional de 770 mm. Sin embargo, la variabilidad espacial es de gran importancia; basta considerar algunos valores, por ejemplo, la precipitación media anual en la estación Pichucalco, Chiapas (a una elevación de 114 msnm), es de 4,000 mm y de 1,120 mm registrados en la estación Comitán, Chiapas (1,530 msnm). Estos valores de lámina de lluvia son importantes y se distribuyen de manera acotada en el tiempo. Esto es, las lluvias presentan una marcada estacionalidad, ocurriendo la mayor parte de ellas durante los meses de junio a octubre. Este breve análisis conduce a la necesidad de conocer de manera clara, simple y precisa su variación espacio-temporal.

Esta gran región es una de las más importantes del país, tanto por lo que se refiere al grupo de corrientes caudalosas que existen, como en lo referente a los usos que se les da a tales caudales. Basta mencionar que una de las más grandes aportaciones de esta

Ilustración 1. Topografía de las regiones hidrológicas 30 y 23. Distribución geográfica de las estaciones utilizadas en este estudio y líneas de corte de los diagramas de Hovmoller.



región es la generación de casi la mitad del total de la capacidad hidroeléctrica de la nación. En la cuenca del río Grijalva se ha desarrollado un sistema hidroeléctrico con 30 unidades de producción, que generan casi 12 mil gigawatts por hora, equivalentes al 7.51% de la energía eléctrica generada por distintos medios y a 47% de la producida por las plantas hidroeléctricas nacionales. Por sus características, el complejo hidroeléctrico instalado en Chiapas se constituye como el de mayor importancia y tamaño en México, destacando cuatro gigantescas centrales: Doctor Belisario Domínguez (La Angostura), Ingeniero Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Netzahalcóyotl (Malpaso) y General Ángel Albino Corzo (Peñitas).

Presentación general del modelo de distribución de lluvia

Como se dijo anteriormente, se propone una combinación de dos leyes probabilísticas para conformar el modelo del régimen de lluvia. Estas dos distribuciones se adaptan a la condición comentada anteriormente referente a la confiabilidad de un modelo. Éste se basa en la idea desarrollada por Babuziaux, en 1969 (Ribstein, 1983), que consistió en cuantificar el número de fugas en una red de distribución de agua potable empleando la ley de Poisson; este modelo ha sido muy utilizado para describir los regímenes de lluvia en África, sobre todo en Benin y Nigeria (Le Barbé y Lebel, 1997); en Burkina Faso (Tapsoba, 1997) y, recientemente, en el

norte de la república mexicana (Gutiérrez, 2003). Las principales hipótesis a considerar son:

- La lluvia sigue un proceso de ocurrencias sin memoria; es decir, la distribución del intervalo entre el inicio de un día cualquiera y el primer evento observado (día con lluvia) es la misma.
- La altura de la lámina de lluvia de cada evento sigue una distribución exponencial.
- El número de eventos (días con lluvia) registrados en una estación de medición sigue una distribución de Poisson.

Si se considera en la primera hipótesis que además el proceso es estacionario, la distribución de la duración entre cada evento seguirá una ley de distribución exponencial. También se puede deducir que sobre este intervalo de tiempo T , el número de eventos (h) sigue una ley de Poisson, por lo que el modelo es básicamente un proceso de Poisson con una distribución exponencial. El parámetro β representa la altura de la lámina de lluvia media por evento lluvioso; este parámetro brinda una ventaja adicional haciendo posible la deducción de la distribución de la lluvia en el periodo $T = kT$ a partir de la distribución calculada para el periodo T , en donde k es la duración media entre cada evento. Esta propiedad se cumple, no importando los valores de T , por lo que:

$$f(x) = f(x, \lambda, \beta) = e^{-\lambda - \frac{x}{\beta}} \lambda \frac{I_1\left(2\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}}\right)}{\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}}} \quad (1)$$

donde:

$f(x)$ es la función de densidad de probabilidad (Poisson + exponencial).

I_1 es la función Bessel de primer orden.

λ es el parámetro que representa el número de eventos (mayor a cero).

β es el parámetro que representa la lámina media de lluvia de cada evento (mayor a cero).

Una de las ventajas de esta formulación estocástica consiste en la posibilidad de considerar diferentes intervalos de tiempo. Es decir, si se toma un valor de T igual a un día, los parámetros obtenidos representan el número de eventos lluviosos λ y su correspondiente lámina media β . Si se analiza, por ejemplo, la serie de lluvia

diaria de los meses de agosto de los años disponibles, al ajustarla a la ecuación 1 se obtiene un valor de λ que corresponderá al número promedio de eventos diarios ($T=1$) para el mes de agosto. Ahora bien, utilizando la propiedad antes mencionada, se tiene que $\beta'=\beta$ y $\lambda'_T=k\lambda_T$, lo que quiere decir que con un valor de $k=31$ (días de agosto) se calcula el parámetro λ para este mes; esto es: $\lambda'_{\text{agosto}}=31\lambda_{\text{diaria agosto}}$ (número de eventos medios ocurridos durante todo el mes de agosto). Mientras que el valor de la lámina media por evento β permanece constante.

Esto quiere decir que el modelo propuesto tiene la propiedad de poder desagregarse en el tiempo. La validación de esta propiedad se verifica al ajustar la serie de datos mensuales del mes correspondiente (en este caso agosto) y comparar los valores de los parámetros calculados con los estimados mediante la propiedad $\beta'=\beta$ y $\lambda'_T=k\lambda_T$. Esta sencilla propiedad representa una importante cualidad en el modelo propuesto; esto es, el modelo poissoniano y el exponencial combinados pueden desagregarse en un tiempo T , bastará con disponer de los datos mensuales para obtener la lluvia en días o hasta en horas y viceversa. Esta propiedad ha sido ampliamente probada y verificada para series de lluvia con más de treinta años de registro (Gutiérrez et al., 2002).

Representación esquemática de resultados

Se utilizaron los registros de 46 estaciones climatológicas (ilustración 1) con más de 25 años de registro en promedio. Empleando la ecuación 1 se estimaron los parámetros λ y β usando los registros de lluvia diaria, a través del método de momentos (Ribstein, 1983; Gutiérrez et al., 2002). Los resultados se presentan en forma de mapas usando el método de Kriging. De esta forma se pueden formar cubos espacio-temporales para cada uno de los parámetros. Es decir, cada cubo estará formado por la superposición de 365 mapas diarios. Una representación esquemática de esta formulación puede verse en la ilustración 2. Por cada punto en el espacio y por cada cubo se puede efectuar un corte en el eje del tiempo, obteniendo un vector de valores diarios. De esta forma, el régimen pluviométrico en un punto dado estará definido por dos perfiles: el número promedio de eventos (h) y su respectiva lámina de lluvia (β). Estos perfiles permiten precisar y seguir de una forma dinámica la variación espacio-temporal de las precipitaciones. A estos diagramas se les conoce con el nombre de diagramas de Hovmoller (ilustración 3).

La facilidad de leer e interpretar estos diagramas

Ilustración 2. Cubo espacio-temporal formado por la cartografía diaria del parámetro h (número de eventos).

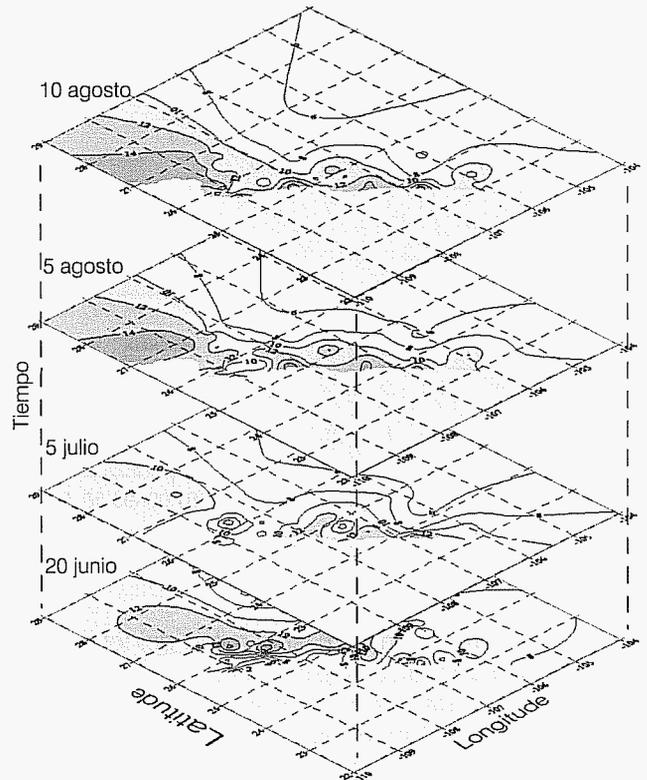
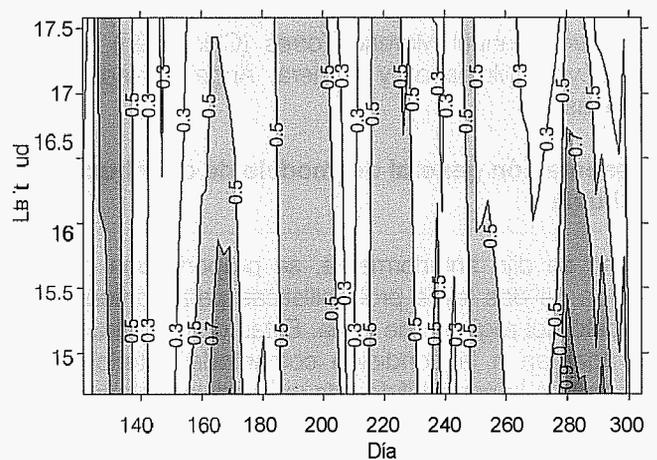


Ilustración 3. Diagrama de Hovmoller para el número medio de eventos (h) en toda la región de estudio.

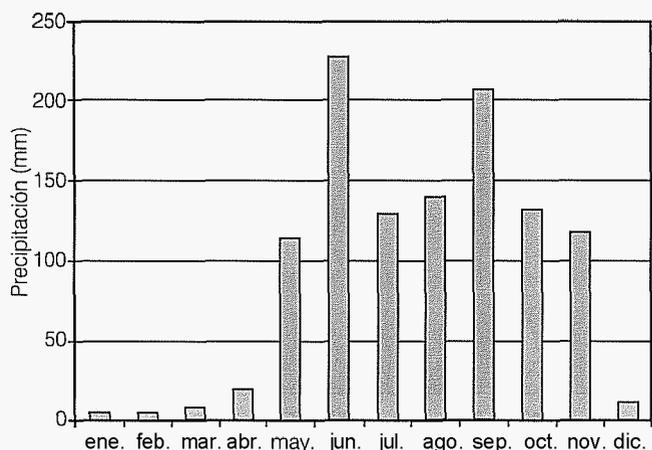


radica en la simplicidad con que se presenta la información. Por ejemplo, para el caso del número de eventos (λ) en toda la región (ilustración 3), puede verse

claramente que los máximos ($\lambda=0.7$ y $\lambda=0.9$) ocurren a los meses de junio (día 166) y octubre (día 285), y que existe un periodo de lluvia menor ($\lambda=0.5$) durante los meses de julio, agosto y septiembre (días 195, 225 y 255, respectivamente). Esto es fácil de comprobar si se analiza la distribución de la lluvia mensual en la estación Comitán, Chiapas, localizada en el centro de la región (ilustración 4). La distribución temporal de la lluvia en esta estación es similar a la distribución analizada mediante el número de eventos lluviosos (A). Para el resto de la región puede observarse un aumento de las precipitaciones para las latitudes inferiores a 15° . Esto se debe a que las regiones costeras están más expuestas a los fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, a lo largo de toda la región (latitudes entre 15° y 17°), durante los meses de julio y agosto se presenta, en promedio, un evento cada tercer día, es decir, $\lambda=0.5$.

Cabe recordar que el clima depende de una serie de factores, como son la latitud, el relieve y la proximidad al mar. La latitud interviene decididamente sobre los vientos a través de la ubicación que éstos tienen dentro de la circulación general de la atmósfera. El relieve influye en algunos casos como regulador climático y, en otros, como canalizador de los flujos atmosféricos. Por regla general se observa que la precipitación es más abundante en las laderas expuestas a la acción del viento o barlovento, que a las de sotavento o laderas protegidas de él. La proximidad del mar afecta la temperatura de las zonas costeras debido al efecto térmico del agua, a su influencia sobre la costa por el aire que entra al continente y también por efecto de las corrientes marinas, funcionando todos estos elementos como reguladores

Ilustración 4. Distribución mensual de la precipitación (1925-1998) en la estación Comitán, Chiapas ($16^\circ 15'$).



de las variaciones diarias y estacionales del tiempo. En el caso de la costa del pacífico mexicano, está influenciada fuertemente por la latitud y la orientación del relieve (Sierra Madre), que en forma paralela al mar actúa como un "activador" de la precipitación. De esta forma es claro que las montañas modifican en gran medida el clima y el tiempo meteorológico tanto a escala regional como local. Como se verá a continuación, los diagramas de Hovmoller presentan de forma clara los efectos de la topografía sobre las precipitaciones y, en general, su variación espacio-temporal. Se debe señalar, sin embargo, que las precipitaciones tienen eventualmente intensidad torrencial y generan inundaciones repentinas y desastres asociados con zonas muy puntuales; por esta razón se propone emplear estos diagramas en función de alguna de las otras variables mencionadas, por ejemplo, la distancia al mar.

La ilustración 5 muestra el diagrama de Hovmoller para la lámina de lluvia media (β) por evento en función de la latitud. Este diagrama representa un detalle más fino que la ilustración 3. Representa un corte de la región de estudio en un eje norte-sur a lo ancho de la longitud geográfica $92^\circ-92.5^\circ$ (ilustración 1). Se observa que a lo largo del periodo de lluvia, mayo a octubre (días 130 a 300), existe una lámina uniforme de lluvia de 10 mm por evento. Los máximos ($\beta=15$ a 20 mm) ocurren en cuatro grandes periodos del año: el primero justamente al inicio del mes de junio (día 151); el segundo, al final del mes de junio (día 180); el tercero y cuarto periodos comprenden los meses de septiembre y octubre (días 260 a 300). Este resultado es similar al que se comentó al analizar el registro de la estación Comitán; sin embargo, el diagrama de Hovmoller arroja información más precisa, en el sentido de que se conoce la lámina media precipitada por evento, en el espacio y el tiempo. Es interesante observar que la zona de lluvia uniforme ($\beta=10$ mm) se extiende entre los $14.5'$ y $15.75'$ de latitud; mientras que los máximos ($\beta=20$ mm) ocurren entre los 15° y $15.50'$; zona que corresponde justamente a las regiones costeras fuertemente afectadas por los fenómenos meteorológicos extremos. Por otro lado, se comentó que es necesario incluir en este tipo de diagramas alguna otra variable como la distancia al océano. La ilustración 6 muestra también la lámina media (β) de lluvia por evento, en función de esta distancia. Es interesante observar cómo este diagrama de Hovmoller ratifica los resultados analizados anteriormente y aporta algunos puntos más. En esta ilustración se detectan los mismos cuatro grandes periodos de lluvia. Asimismo, se observan dos periodos similares, pero intercalados en el tiempo y en el espacio; esto es, la ilustración 6 muestra una división de la región de estudio en tres

Ilustración 5. Diagrama de Hovmoller para la lámina media de lluvia (β) (mm) por evento, en función de la latitud a lo ancho del eje 92°-92.5°.

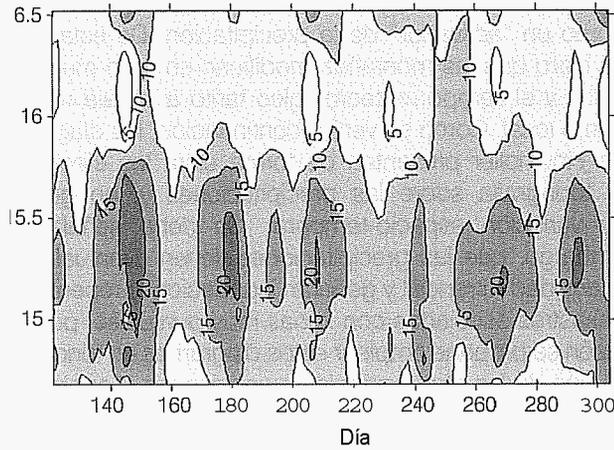
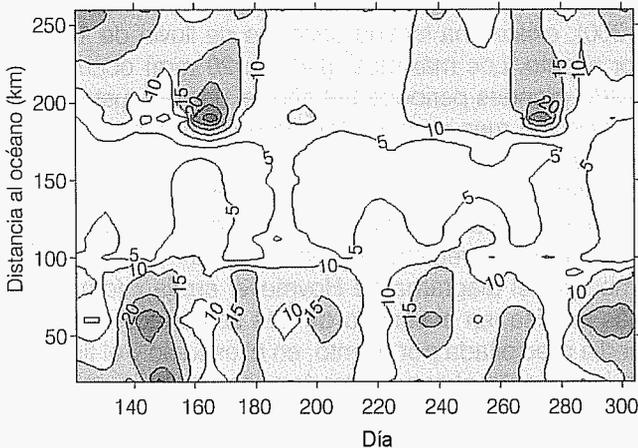


Ilustración 6. Diagrama de Hovmoller para la lámina media de lluvia (β) (mm) por evento, en función de la distancia al océano a lo ancho del eje 16°-16.5°.



grandes zonas. La primera comprende los primeros 100 km, contados a partir de la costa en donde ocurren los cuatro periodos de lluvia ya mencionados. Una segunda zona se ubica entre los 100 y 180 km de la costa; aquí la lámina de lluvia por evento es, en promedio, de 5 mm, lo que corresponde a la planicie interior del estado de Chiapas, en donde efectivamente la lluvia es de menor intensidad que en la parte baja de la sierra. La tercera región comprende distancias superiores a los 180 km de la costa y ubica, por lo tanto, el comienzo de la región lluviosa expuesta a las masas de aire húmedo procedentes del Golfo de México. En esta zona, contra-

riamente a lo que sucede en la costa del Pacífico, se presentan sólo dos grandes periodos de lluvia: el primero corresponde al mes de junio (días 150 a 180) y el segundo, a la temporada de huracanes (días 260 a 280; 17 de septiembre a 7 de octubre). Fenómenos efectivamente identificados durante estos periodos en la costa del Golfo de México.

De forma similar se analiza el diagrama de Hovmoller para el número de eventos (A). La ilustración 7 muestra un detalle del número de eventos ocurridos dentro de la franja de 100 km de la costa. Es interesante observar cómo se mantiene la constante de $\lambda=0.5$ durante los cuatro principales periodos de lluvia ya detectados. Asimismo, esta configuración (A -distancia al océano) detecta la presencia del obstáculo que representa la Sierra Madre de Chiapas, que comienza a los 50 km de la costa y termina a los 80 km. Esto quiere decir que los días con más probabilidad de lluvia $\lambda>0.7$ se presentan a una distancia inferior de 55 km de la costa o a más de 80 km, lo que corresponde justamente a la vertiente de la sierra. Finalmente, se pueden construir diagramas de Hovmoller en la dirección que se quiera. Por ejemplo, si se desea conocer cuál periodo del año es el más propicio para mantener una lámina de lluvia constante y en qué posición se ubica esta zona, la respuesta es visible si se analiza, por ejemplo, la ilustración 8, donde el diagrama de Hovmoller se realizó a partir de un corte perpendicular a la costa. Se aprecia que una lámina constante de 10 mm ($\beta=10$) ocurre desde la costa hasta los 100 km, durante los días 240 a 255; esto es, desde finales de agosto hasta mediados de septiembre.

Ilustración 7. Diagrama de Hovmoller para el número medio de eventos (h) en función de la distancia al océano a lo ancho del eje 92°-92.5°.

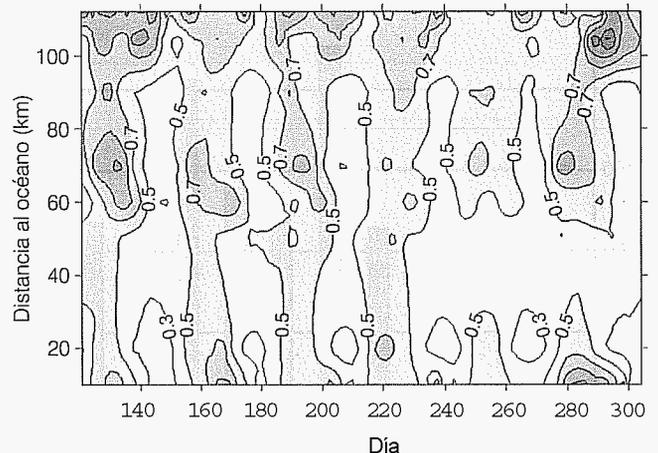
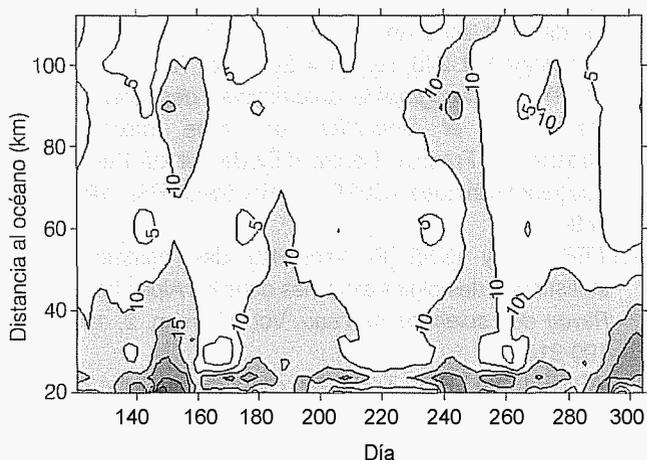


Ilustración 8. Diagrama de Hovmoller para la lámina media de lluvia (β) (mm) por evento, en función de la distancia al océano a lo ancho de un eje perpendicular a la costa.



Conclusiones

La lluvia en el sur de la república mexicana es, sin duda, un fenómeno complejo para estudiar; sin embargo, los resultados que se obtienen al aplicar un modelo poissoniano y una distribución exponencial han permitido, sin haber utilizado una mapa de isoyetas (tradicionalmente empleadas en hidrología para conocer la variación de la precipitación), tener un conocimiento del régimen de las precipitaciones en la región sur de México. Este modelo conjunto muestra ventajas: en un principio permite conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia mediante el uso de sus dos parámetros (h y β); la interpretación sencilla de estos parámetros permite encontrar relaciones con su entorno geográfico y físico; se demuestra que el modelo propuesto es significativamente consistente con la descripción de los cambios asociados también con los fenómenos extremos, ya que permite identificar en una forma confiable la temporada normal de lluvias, así como los efectos de la temporada de huracanes, a través de la evolución de los parámetros mencionados; la representación de los mismos, utilizando los diagramas de Hovmoller, permite explicar el comportamiento espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona; se obtuvo una lámina media de lluvia por evento de 10 mm ($\beta=10$), a lo largo de las latitudes 15 a 15.5° (ilustración 5); mientras que si se calcula, por ejemplo, para esta misma latitud, directamente del registro de la estación Hacienda Las Maravillas (clave 07072) resulta de 9.97 mm.

Respecto al número de eventos, se obtuvieron valores superiores a 0.70 ($\lambda \geq 0.70$) para las estaciones que se encuentran a más de cien kilómetros de la costa. Por ejemplo, para la estación Argelia (clave 07011) a 104 kilómetros de la costa, durante un periodo de 25 años se registraron, para el mes de agosto ($31 \cdot 25 = 775$ días), 569 eventos (días con lluvia). Esto quiere decir que, en promedio, se registraron 0.73 eventos por día ($569/775$). Para verificar lo anterior basta referirse a la ilustración 7, en donde se puede observar que para el mes de agosto (días 213 a 243), a una distancia del océano superior a cien kilómetros, efectivamente $\lambda \geq 0.70$. Este mismo análisis a manera de comprobación se llevó a cabo en todas las estaciones que se ubican dentro de la Región Hidrológica 30, lo que permite afirmar que la representación gráfica de los parámetros del modelo propuesto adquiere un sentido físico, real y práctico, al representarlos con ayuda de los diagramas de Hovmoller. Además, estos diagramas representan una forma novedosa de analizar el régimen de lluvias, ya que permiten identificar zonas con valores mínimos, máximos y sus periodos asociados con una cierta región, y pueden ser explotados tan detalladamente como se desee; basta emplear las variables significativas de la región.

Las regiones hidrológicas 30 y 23 muestran un comportamiento típico de una región afectada por fenómenos extremos, ya que los principales riesgos se presentan en las zonas costeras y en la zona de alta pluviosidad (vertiente).

Finalmente, se considera que la metodología propuesta basada en una cartografía de los campos de lluvia, utilizando el método de Kriging y representados en diagramas de Hovmoller, así como el empleo de un modelo conjunto Poisson-exponencial, puede ser adaptado para generar mapas de riesgo hidrológico, ya que el número de días con lluvia (λ) puede ser asociado con las sequías y con una lámina de lluvia mínima (β) (Gutiérrez et al., 2002).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la señorita Martha Juárez Roman su valiosa colaboración en la captura, exploración y tratamiento de la base de datos de precipitación para esta región.

Recibido: 26/11/2003
Aprobado: 03/02/2004

Referencias

BARCELO, A. y COUDRAY, J. Nouvelle carte des isohyetes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif

- du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol. 4, 1996, pp. 457-484.
- BERNDTSSON, R. y NIEMCZYNOWICZ, J. Spatial and temporal characteristics of high-intensity rainfall in northern Tunisia. *Journal of hydrology*. Vol. 87, 1988, pp. 285-298.
- BLANCHET, G. Analyse cartographique de la pluviométrie annuelle dans la région Rhône-Alpes. *Eaux et climat*, CNRS, 1981, pp. 109-115.
- BO, Z., ISLAM, S. y ELTAHIR, E. A.B. Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model. *Water resources research*. Vol. 30, núm. 12, 1994, pp. 3423-3435.
- BRUIJN, E.I.F. DE y BRANDSMA, T. Rainfall prediction for a flooding event in Ireland caused by the remnants of hurricane Charley. *Journal of hydrology*. Vol. 239, núm. 1-4, 2000, pp. 148-161.
- CREUTIN, J. y OBLED, C. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water resources research*. Vol. 18, núm. 2, 1982, pp. 413-431.
- FERRO, V. y PORTO, P. Regional analysis of rainfall-depth-duration equation for South Italy. *Journal of hydrologic engineering*. Vol. 4, núm. 4, 1999, pp. 326-335.
- FOUFOULA-GEORGIU, E. y LETTENMAIER, D.P. A markov renewal model for rainfall occurrences. *Water resources research*. Vol. 23, núm. 5, 1987, pp. 875-884.
- GARCÍA, N. y VARGAS, W. The spatial variability of runoff and precipitation in the Río de La Plata basin. *Journal des sciences hydrologiques*. Vol. 41, núm. 3, 1996, pp. 279-299.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*. Vol. 228, núm. 1-2, 2000, pp. 113-129.
- GUTIÉRREZ, A. *Modélisation stochastique des régimes pluviométriques à l'échelle régionale pour la prévision des crues au nord-Mexique*. Th.D. Grenoble, Francia: Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), INP, 2003, pp. 173.
- GUTIÉRREZ, A., LEBEL, T. y DESCROIX, L. *Statistical analysis for modelling the hydrological risk in Northern Mexico*. San Petersburgo, Rusia: International Association for Hydraulic Research (IAHR) Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety of Hydraulic Structures, 2002.
- HADEN, T., KERSCHBAUM, M., KAHLIG, P. y NOBILIS, F. A refined model of the influence of orography on the mesoscale distribution of extreme precipitation. *Journal des sciences hydrologiques*. Vols. 37, 5, 10, 1992, pp. 417-427.
- HOLAWA, F. y DUTTER, R. Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space. *Journal of hydrology*. Vol. 219, núm. 1-2, 1999, pp. 70-82.
- HUBER, A. e IROUMÉ, A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of hydrology*. Vol. 248, núm. 1-4, 2001, pp. 78-92.
- HUMBERT, J. *Cartographie automatique des précipitations mensuelles et annuelles en zone montagneuse*. Strasbourg, Francia: Centre d'Études et de Recherches Écogéographiques (CEREG, URA 95-CNRS), 1995, pp. 168-173.
- KIEFFER, A. y BOIS P. Variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes dans les Alpes françaises. *Revue des sciences de l'eau*. Vol. 10, núm. 2, 1997, pp. 199-216.
- LE BARBÉ, L. y LEBEL, T. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of hydrology*. Vol. 188-189, núm. 1-4, 1997, pp. 43-73.
- LE BARBÉ, L., LEBEL, T. y TAPSOBA D. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *Journal of climate*. Vol. 15, núm. 2, 2002, pp. 187-202.
- LEBEL, T. y LABORDE, J. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. *Stochastic hydrology and hydraulics*. Vol. 2, 1988, pp. 245-261.
- OBERLIN, G. y HUBERT, P. *Refondation du concept de régime hydrologique*. Lyon, Francia: Rapport Quadriennal. CNFGG 95-98, 1998, pp. 269-277.
- PERRIN, C., MICHEL, C. y ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of hydrology*. Vol. 242, núm. 3-4, 2001, pp. 275-301.
- RIBSTEIN, P. Loi des fuites. *Cahiers, Orstom, série. Hydrologie*. Vol. XX, núm. 2, 1983, pp. 117-141.
- RODRÍGUEZ, I., GUPTA, V. K. y WAYMIRE, E. Scale considerations in the modeling of temporal rainfall. *Water resources research*, Vol. 20, 1984, pp. 1611-1619.
- SEN ZEKAI y HABIB ZEYAD Z. Point cumulative semivariogram of areal precipitation in mountainous regions. *Journal of hydrology*. Vol. 205, núm. 1-2, 1998, pp. 81-91.
- SIVAPALAN, M. y BLOSCHL, G. Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity-duration-frequency curves. *Journal of hydrology*. Vol. 204, núm. 1-4, 1998, pp. 150-167.
- TAPSOBA, D. *Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement*. Th. D. Paris: Université de Paris XI (Orsay), 1997.

Abstract

GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A., LEBEL, T. & MEJÍA-ZERMEÑO, R. Space-time study of the pluviometric regime in southern Mexico. *Hydraulic engineering in Mexico* (in Spanish). Vol. XX, no. 1, January-March, 2005, pp. 57-65.

The Mexican Republic, with an area of 2,000,000 km², presents important temporal and spatial variations of rainfall; with values ranging from 200 mm in the north to 3,000 mm in the south. A Poisson probability distribution is used to describe the mean number of events (λ) and an exponential distribution is used to describe the mean event rainfall (β). The regionalization is carried out in a geostatistical framework and the use of Hovmoller diagrams is suggested to characterize the pluviometric regime in southern Mexico. It is confirmed that these diagrams represent a powerful tool of rainfall formulation patterns, while clearly and simply displaying the relationship between the mean number of events and the mean event rainfall, as well as its temporal and spatial variation. The results appear for hydrological region 30, an area bordering with Guatemala and Belize. The results suggest that the proposed probability distributions explain the space-time variation of precipitation.

Keywords: rainfall climatology, Kriging, Poisson distribution, exponential distribution, Hovmoller diagram, hydrological regionalization, southern Mexico.

Dirección institucional de los autores:

Alfonso Gutiérrez-López

Doctor en Medios Geofísicos y Medio Ambiente.
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA,
Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00, extensión 886,
fax: + (52) (777) 3 29 36 81,
agutierrez@tlaloc.imta.mx

Thierry Lebel

Doctor en Medios Geofísicos y Medio Ambiente,
Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement,
LTHE,
BP53 Cedex 9,
38041 Grenoble, France,
teléfono: + (33) (0) 476 82 52 85,
fax: + (33) (0) 476 82 52 86,
lebel@lmg.inpg.fr

Roberto Mejía-Zermeño

Maestro en Ingeniería Hidráulica.
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA,
Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00, extensión 857,
fax: + (52) (777) 3 29 36 81,
rmejia@tlaloc.imta.mx