

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA APOYADA EN RADARES METEOROLÓGICOS

• Baldemar Méndez-Antonio •
Universidad de Sonora, México

• Gabriel Soto-Cortés* •
Universidad Autónoma Metropolitana, México

*Autor de correspondencia

• Fabián Rivera-Trejo •
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

• Ernesto Caetano •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

MÉNDEZ-ANTONIO, B., SOTO-CORTÉS, G., RIVERA-TREJO, G. & CAETANO, E. Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 1, enero-febrero de 2014, pp. 83-101.

En América Latina, la modernización de los sistemas meteorológicos alentará el uso de modelos hidrológicos distribuidos con fines de pronóstico y alerta temprana. En este sentido, los instrumentos de percepción remota como los radares y satélites meteorológicos cobran mayor importancia como elementos básicos en la generación de datos para la simulación hidrometeorológica. En una primera etapa en este proceso de desarrollo el radar es pieza clave por su capacidad de detectar la distribución espacial de la lluvia a niveles de resolución ideales para modelos hidrológicos. Con esta perspectiva, en este trabajo se presenta el desarrollo de un esquema de simulación hidrológica basado en el modelo distribuido del hidrograma unitario de Clark modificado, alimentado con datos de radar. En el artículo se consideran los conceptos que sustentan el modelo y se ejemplifica su implementación, calibración y validación a través de un caso de estudio en una cuenca experimental. Los resultados muestran la capacidad del modelo distribuido basado en datos de radar para reproducir el hidrograma de escurrimiento tanto en su volumen como en el valor del escurrimiento pico. La simulación muestra que el valor del tiempo de retraso de la tormenta, comparado contra el tiempo pico del escurrimiento, abre una ventana de oportunidad para la toma de decisiones y la mitigación de riesgos, la salvaguarda de las vidas humanas y sus bienes. De lo anterior se concluye que la modelación hidrológica distribuida basada en datos de radar tiene amplias posibilidades de aplicación, principalmente en la implementación de sistemas de alerta temprana, en complemento a una red suficiente de monitoreo en tierra.

Palabras clave: radar meteorológico, modelos lluvia-escurrimiento, modelos hidrológicos distribuidos, sistemas de alerta temprana.

Abstract

MÉNDEZ-ANTONIO, B., SOTO-CORTÉS, G., RIVERA-TREJO, G. & CAETANO, E. Distributed hydrological modeling based on weather radar. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 1, January-February, 2014, pp. 83-101.

In Latin America, the modernization of weather systems encourage the use of distributed hydrological models for forecasting and early warning. In this sense, remote sensing instruments, such as radar and weather satellites, become more important as basic elements in the generation of data for hydro-meteorological simulation. As a first step in this development process, radar is a key component for its ability to detect the spatial distribution of rainfall with an ideal resolution level for hydrological models. With this perspective, this paper presents the development of a hydrological simulation scheme based on the distributed model Modified Clark Unit Hydrograph, using radar data. In the paper the concepts underlying the model and illustrates its implementation, calibration and validation through a case study in an experimental catchment. The results show the ability of the radar-based distributed model to reproduce the runoff hydrograph in both volume and peak runoff value. The simulation shows that the lag time rainfall, compared against the peak runoff, opens a window of opportunity for decision-making and risk mitigation, safeguarding human lives and property. From the above it is concluded that distributed hydrological modelling based in radar has broad applicability in the implementation of early warning systems in addition to an adequate network of ground monitoring.

Keywords: weather radar, rainfall-runoff models, distributed hydrological models, early warning systems.

Introducción

Debido a que los fenómenos hidrometeorológicos extremos regularmente afectan a múltiples sectores (urbano, agrícola, salud, etcétera). Los impactos de este tipo de eventos se acumulan frecuentemente en retroceso de los beneficios del desarrollo. Es tal la importancia de estas afectaciones que dentro de las conclusiones de países firmantes de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (UNISDR, 2010) se consideran una de las principales limitantes para alcanzar las metas de las naciones. Por lo tanto, en la última década se han creado organismos internacionales dedicados a la reducción de la vulnerabilidad y al aumento de la resiliencia en los países con mayor vulnerabilidad a los desastres provocados por fenómenos naturales. Lo aprendido hasta ahora hace que el aumento de la resiliencia se vea como una inversión, no un costo; y las estrategias de reducción de desastres serán implantadas exitosamente cuando gobierno y ciudadanía entendamos que, más que un hecho fortuito, los desastres provocados por amenazas naturales constituyen una falta de previsión y demuestra nuestra propia negligencia (Informe ONU, 2004). Se considera que la reducción del riesgo de desastre y el aumento de la capacidad de respuesta a los peligros naturales en diferentes sectores del desarrollo pueden tener efectos multiplicadores y acelerar la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (UNISDR, 2010). Al respecto, el Informe de Evaluación Global sobre la Reducción de Desastre de 2011 (United Nations, 2012) propone replantear el desarrollo, ampliando la inversión de gestión del riesgo de desastre y hace un llamado de atención sobre la sequía, que afecta de forma desproporcionada los hogares rurales pobres.

Por otra parte, en 2005, 168 países adoptaron el Marco de Acción de Hyogo (MAH), con el fin de lograr para el año 2015 “la reducción considerable de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto de vidas como de bienes sociales, económicos y ambientales de las comunidades y los países” (UNISDR, 2010).

El MAH se adoptó durante la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres, al igual que el respaldo subsiguiente que obtuvo de la Asamblea General de las Naciones Unidas. Las acciones están enfocadas al aumento de la resistencia y de la resiliencia en las naciones y de las comunidades ante los desastres.

El MAH establece tres objetivos estratégicos para lograr los resultados perseguidos:

1. Integración efectiva de la consideración del riesgo de desastre en las políticas, los planes y los programas de desarrollo en todos los niveles, con especial énfasis en la prevención y mitigación de los desastres, la preparación para casos de desastres y la reducción de la vulnerabilidad.
2. El desarrollo y fortalecimiento de las instituciones, mecanismos y capacidades a todos los niveles que puedan contribuir de manera sistemática a aumentar la resiliencia ante las amenazas.
3. En la fase de reconstrucción de las comunidades damnificadas, la incorporación sistemática de criterios de reducción del riesgo en el diseño y la ejecución de los programas de preparación para situaciones de emergencia, de respuesta y recuperación.

Las acciones necesarias planteadas para alcanzar estos objetivos son:

- a) Velar porque la reducción del riesgo de desastres constituya una prioridad nacional y local dotada de una sólida base institucional para su aplicación.
- b) Identificar, evaluar y vigilar los riesgos de desastre y potenciar la alerta temprana.
- c) Utilizar el conocimiento, la innovación y la educación para establecer una cultura de seguridad y de resiliencia a todo nivel.
- d) Reducir los factores subyacentes del riesgo.
- e) Fortalecer la preparación en casos de desastres, a fin de asegurar una respuesta eficaz a todo nivel.

Además, con el fin de aumentar el compromiso entre los responsables locales de la toma de decisiones y los líderes urbanos, la UNISDR y sus organizaciones socias pusieron en marcha en 2010 la Campaña Mundial: “¡Desarrollando ciudades resilientes - ¡Mi ciudad se está preparando!” (ONU, 2012). Los objetivos de la campaña son aumentar la comprensión y fomentar el compromiso de los gobiernos locales y nacionales para que la reducción de riesgos y el incremento de la resiliencia a los desastres y al cambio climático sean una prioridad en sus políticas. Igualmente, toman el Marco de Acción de Hyogo como referente para abordar más de cerca las necesidades locales (ONU, 2012).

Esta campaña fomenta la transmisión de conocimiento especializado y destrezas, así como apoyo técnico para alcanzar el objetivo de generar resiliencia con base en “Diez Aspectos Básicos para el Desarrollo de Ciudades Resilientes”. Estos aspectos son:

1. Establecer la organización y coordinación necesaria para comprender y reducir el riesgo de desastre dentro de los gobiernos locales con base en la participación de los grupos de ciudadanos y de la sociedad civil (establecer alianzas locales).
2. Asignar un presupuesto para la reducción del riesgo de desastres y ofrecer incentivos a los propietarios de viviendas, a las familias de bajos ingresos, a las comunidades, los negocios y el sector público, para que inviertan en la reducción de los riesgos que enfrentan.
3. Mantener información actualizada sobre las amenazas y vulnerabilidades, que conduzca a evaluaciones del riesgo, y emplearlas como base para los planes y las decisiones relativas al desarrollo urbano. Velar porque esta información y los planes para la resiliencia de la ciudad estén disponibles a todo el público.
4. Invertir y mantener una infraestructura que reduzca el riesgo, como desagües para evitar inundaciones y, según sea necesario, adaptarse de forma tal que pueda hacerse frente al cambio climático.
5. Evaluar la seguridad de todas las escuelas e instalaciones de salud, y mejorarlas cuando sea necesario.
6. Aplicar y hacer cumplir reglamentos de construcción y la planificación del uso del suelo que sean realistas y cumplan con los aspectos relativos al riesgo. Identificar terrenos seguros para los ciudadanos de bajos recursos.
7. Velar por el establecimiento de programas educativos y de capacitación sobre la reducción del riesgo de desastres tanto en las escuelas como en las comunidades locales.
8. Proteger los ecosistemas y las zonas naturales de amortiguamiento para mitigar las inundaciones, las marejadas ciclónicas y otras amenazas a las que la ciudad podría ser vulnerable. Hay que adaptarse al cambio climático, al recurrir a las buenas prácticas para la reducción del riesgo.
9. Instalar sistemas de alerta temprana y desarrollar capacidades para la gestión de emergencias en la ciudad y llevar a cabo con regularidad simulacros para la preparación del público en general en los cuales participen todos los habitantes.
10. Después de un desastre, velar porque las necesidades de los sobrevivientes se sitúen al centro de los esfuerzos de reconstrucción, y se les apoye tanto a ellos como a sus organizaciones comunitarias para el diseño y la aplicación de respuestas, lo cual incluye la reconstrucción de sus hogares y sus medios de sustento.

Para alcanzar estas metas se debe superar la percepción de que el presupuesto para la gestión de riesgos de desastre compite por escasos recursos contra otras prioridades; la reducción del riesgo debe formar parte integrante del desarrollo local. La gestión integral u holística del riesgo de desastres es más atractiva cuando responde de forma simultánea a las necesidades de muchos socios participantes y de otras prioridades

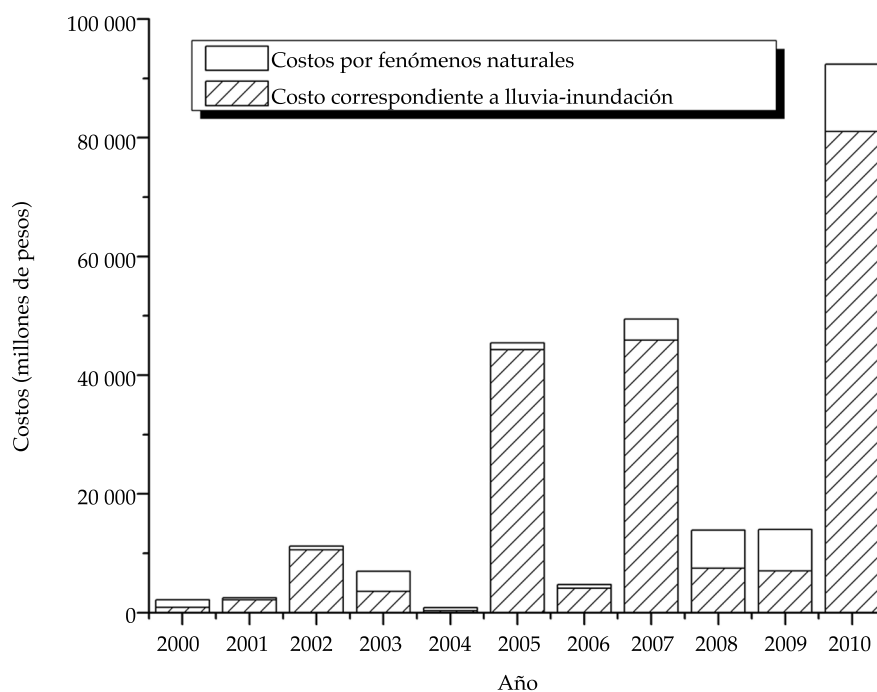


Figura 1. Costos por fenómenos naturales en México (información de Cenapred, 2010).

competidoras. Por lo general, los incentivos son mayores cuando la gestión de riesgos de desastres contribuye de manera visible en la mejora del bienestar económico y social.

Cabe la pena señalar que en México, dentro del ámbito de los desastres naturales, los que se deben a fenómenos hidrometeorológicos generan más del 95% de las pérdidas directas e indirectas (figura 1), de manera que es de esperarse se implementen cada vez mejores medidas de mitigación.

Como se observa de lo expuesto previamente, dentro de la gestión del riesgo de desastres, una acción reiterada es la relativa al desarrollo e implementación de sistemas de alerta temprana, lo que supone la incorporación de modelos hidrometeorológicos a tiempo real. En tal contexto, en este trabajo se presenta el desarrollo y la aplicación de un modelo distribuido que persigue dicho fin, aprovechando el crecimiento de la infraestructura del sector.

Buscando la mejora en la prevención de los desastres por fenómenos hidrológicos

extremos, el desarrollo de los modelos hidrológicos distribuidos ha tenido gran auge en las últimas tres décadas (Beven, 1985; Smith, 2004), los cuales, aunados a la capacidad de cómputo actuales, facilitan el tránsito hacia modelos hidrológicos operativos (a tiempo real). En dichos modelos, la variabilidad espacial y temporal de la precipitación tiene un impacto significativo sobre los resultados de la modelación hidrológica (Faures *et al.*, 1995; Morín *et al.*, 1995; Guichard, 2004). En este sentido, los instrumentos de percepción remota, como radares y satélites meteorológicos, debido a su capacidad de estimar la variabilidad espacial de la precipitación son instrumentos ideales para su empleo en la modelación hidrológica distribuida a tiempo real, inmersos en sistemas operativos de alerta temprana con fines tanto de pronóstico como de prevención de eventos extremos.

En México, el uso de esta tecnología es incipiente, aunque en los años por venir se espera un crecimiento significativo y acelerado

del sector. Apenas en 2008 se incluyeron dentro del Plan Nacional Hídrico (Conagua, 2008) estrategias tendientes a la modernización del Servicio Meteorológico Nacional, con el objetivo de prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos. Aunado a lo anterior, en el estudio de prospectiva de la política pública del sector hídrico mexicano denominado "Agenda del Agua 2030" (Conagua, 2011) se incluyen iniciativas tendientes a procurar asentamientos seguros contra inundaciones, con una inversión estimada en 107 mil millones de pesos (Presidencia de la República, 2012). Dentro de las acciones se prevé modernizar estructura, instalaciones y operación del Sistema Meteorológico Nacional, así como las redes de medición y observación, con el fin de tomar las previsiones necesarias y evitar catástrofes relacionadas con los fenómenos meteorológicos extremos. Se espera que estas inversiones se sumen a una infraestructura que cuenta con un Centro Nacional de Datos y un Centro Nacional de Previsión del Tiempo, una red de 13 radares, una red de ocho estaciones terrenas receptoras de imágenes satelitales, una red de observatorios de superficie compuesta por 89 estaciones sinópticas y 133 automáticas, que se complementan con las redes de cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Presidencia de la República, 2012).

Así, este trabajo presenta el desarrollo de un modelo hidrológico distribuido, alimentado a partir de datos de un radar meteorológico, cuya finalidad está orientada al desarrollo de un sistema hidrológico completo a tiempo real, que tenga aplicación en un sistema de alerta temprana contra inundaciones. El modelo, basado en el Hidrograma Unitario de Clark Modificado, se aplicó a la cuenca experimental del río Mixcoac, ubicada en la Ciudad de México.

La modelación hidrológica distribuida

En los modelos hidrológicos tradicionales se considera que el escurrimiento en ríos

de montaña se produce por la precipitación excedente, a este componente del gasto se le denomina escurrimiento directo o superficial, y a la porción del volumen de precipitación que la produce se le llama precipitación en exceso o efectiva (Horton, 1933). Mediante una función de transferencia, tal volumen se convierte en escurrimiento directo y, tras sumarle el gasto base, se obtiene el hidrograma de escurrimiento total. Un esquema como el anterior corresponde a los modelos hidrológicos de parámetros concentrados, los cuales utilizan promedios espaciales tanto de las características fisiográficas como de la precipitación en la cuenca y sólo reproducen la variabilidad temporal de la respuesta en la salida de la cuenca. Por otra parte, la modelación hidrológica distribuida considera la variabilidad espacial de las propiedades físicas y la precipitación al dividir la cuenca en microcuencas o celdas. Naturalmente, el desarrollo en los campos de teledetección y sistemas de información geográfica ha facilitado el manejo de información espacialmente distribuida. La práctica común, hasta hace algunos años, era la de emplear representaciones agregadas, por lo que no se había podido establecer una base de datos para el uso de los modelos distribuidos, principalmente debido a las limitaciones computacionales o a la insuficiencia de los datos.

Las desventajas asociadas con los modelos agregados por subcuencas según Vieux (2001) incluyen: a) se ignoran o promedian las variaciones de las propiedades de las subcuencas y b) resultan engorrosos para manejar los datos si se tiene un gran número de subcuencas.

Una ventaja de los modelos distribuidos es que permiten el análisis de distintos elementos que influyen en la respuesta hidrológica y que pueden modificarse por la intervención humana en la cuenca o en parte de ella, como son el caso de la vegetación y del uso del suelo. Además, con una calibración adecuada, los modelos distribuidos permiten estimar

el cambio en la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación extrema, causados por estas intervenciones. Los modelos distribuidos pueden también obtener de forma simultánea los caudales en diferentes puntos de la cuenca. En estos casos, el modelo sirve para mejorar la evaluación del riesgo ante inundaciones, pues permite conocer el estado del sistema en cualquier punto de la red de drenaje. Es decir, en los modelos distribuidos, la variación espacial de la precipitación, la infiltración, pérdidas y escurrimiento están explícitamente considerados, mientras que en los modelos agregados estas variaciones espaciales son promediadas o ignoradas.

Características generales del modelo distribuido con fines operativos

Desde el punto de vista operativo, el modelo debe ser sencillo y ágil para disminuir los tiempos de ejecución, pero sin perder la representación física del sistema. La sencillez y agilidad de operación del modelo son claves en el caso de utilizar el modelo para fines de pronóstico operativo (a tiempo real). Por esta razón, los modelos hidrológicos que contienen muchos parámetros no resultan atractivos para la modelación distribuida, sobre todo en países como México, con poca tradición de mediciones, ya que al tratar de representar la variabilidad espacial se necesitan determinar todos los parámetros para cada uno de los componentes del sistema (Vélez, 2001).

Aunque se tiene la creencia de que implementando sistemas de información geográfica (SIG) se resuelve el problema, éstos sólo facilitan el procesamiento y la determinación de parámetros fisiográficos de las cuencas, mas no aportan mejoras ante la escasez o mala calidad de datos de lluvia.

La caracterización del campo de lluvia es fundamental en la modelación hidrológica distribuida. En este aspecto, la red de pluviógrafos no es suficiente, debido a que estos equipos no detectan de manera necesaria la zona más intensa de la tormenta, por lo

que el campo de lluvia interpolado es poco acorde con la realidad. En este sentido, los modeladores han puesto gran interés en la estimación de la precipitación a partir de datos de radares meteorológicos, que potencialmente proporcionan una buena opción para resolver este problema, ya que estiman la lluvia al nivel de detalle espacial requerido por los modelos hidrológicos distribuidos. En este sentido se han dado algunos pasos iniciales al considerar la posibilidad de emplear este tipo de datos en modelos tan populares como el *HEC-HMS*, *SWAT*, *CEQUEAU*, *MIKE-SHE*, *TOP MODEL*, *MERCEDEZ*, *TOPKAPI*, etcétera, considerando este tipo de datos (Lastoria, 2008).

Modelo hidrológico distribuido

El modelo hidrológico distribuido desarrollado se compone de dos submodelos conceptuales: uno que generó o produjo el escurrimiento y que se encargó de representar la producción de las distintas componentes del escurrimiento en cada una de las variables que integran al sistema distribuido, y otro que lo transitó y que representó el viaje del escurrimiento aguas abajo en la red de drenaje hasta llegar a la salida de la cuenca. A continuación se describen cada uno de los submodelos.

Submodelo de producción del escurrimiento

Para la modelación, la cuenca hidrográfica se representa por un conjunto de celdas rectangulares, donde cada celda se considera como la unidad básica de producción de escurrimiento. La producción del escurrimiento en cada una de las celdas o unidades hidrológicas se obtuvo a partir del modelo de pérdidas. Estas pérdidas hidrológicas están formadas por las pérdidas iniciales y el agua que se sigue infiltrando en el suelo durante la tormenta. Las pérdidas iniciales comprenden el agua interceptada por la vegetación, el agua que se almacena en las depresiones de la superficie formando charcos y el agua que se infiltra en el suelo hasta que se satura.

Habría que considerarse que en la metodología propuesta no se cuantifica de forma explícita el volumen de evaporación, el cual podría ser considerable en regiones áridas y semiáridas, o en aquellas tormentas sobre áreas limitadas en horarios de alta radiación solar. Lo anterior se debe a que se modela por eventos; en los modelos hidrológicos continuos (largo plazo), se considera esta variable. Sin embargo, en la modelación por eventos se tiene la capacidad de considerar la precipitación antecedente y, en el modelo aquí presentado, las condiciones de humedad antecedente del suelo.

En la determinación del escurrimiento se empleó por su sencillez el método del Natural Resources Soil Conservation Service (SCS) o número de curva (CN) (Frevert y Singh, 2002). Éste es uno de los métodos más utilizados para la estimación de los volúmenes de escurrimiento; su éxito se debe a que toma en cuenta, a partir de un solo parámetro, las principales características físicas de la cuenca que produce el escurrimiento, como son la pendiente, el uso y tipo de suelo. Este método, además de su fácil aplicación, tiene la ventaja de su predictibilidad, estabilidad, y se trata de un método conceptual para estimar el escurrimiento directo a partir de la precipitación (Ponce y Hawkins, 1996).

En su aplicación, una vez dividida la cuenca en celdas cuadradas, a cada una, a partir de sus propiedades del suelo, se le define el valor del número de curva y, a partir de éste, se estima su almacenamiento máximo. El volumen de agua que no se convierte en escurrimiento se infiltra al subsuelo, donde una parte se almacena como humedad y el resto pasa al almacenamiento subterráneo para formar el gasto base.

El método del SCS no incluye explícitamente ningún esquema de infiltración, por lo que éste se estimó directamente del escurrimiento superficial acumulado a partir de la precipitación acumulada, la capacidad de almacenamiento del suelo y las pérdidas iniciales. La conversión de lluvia a escurrimiento esencial en la modelación hidrológica superficial se basa en la conservación de masa o balance hídrico:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (1)$$

donde P es la precipitación total (cm); P_e la precipitación efectiva (cm); I_a la infiltración inicial (cm); F_a la infiltración acumulada (cm). I_a y F_a representan las pérdidas y su cuantificación se basa en dos hipótesis fundamentales. La primera establece que la relación entre el volumen de precipitación efectiva (P), o escurrimiento directo, y el escurrimiento potencial máximo ($P - I_a$), correspondiente a una superficie impermeable, es igual a la relación entre la infiltración real F_a y la infiltración potencial máxima S (ecuación (2)). La segunda hipótesis supone que la infiltración inicial es directamente proporcional a la retención potencial (ecuación (3)):

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

Suponiendo $I_a = 0.2 S$:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

Dado el valor de S , en cm, como:

$$S = \frac{2540 - 25.4 CN}{CN} \quad (6)$$

Se obtiene el valor de P_e (Aparicio, 1994) como:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (7)$$

Donde CN (número de curva) habrá de determinarse a partir del uso y tipo de suelo, según el criterio del US Soil Conservation Service. Las ecuaciones (6) y (7) son válidas para $P \geq I_a$. El parámetro I_a con frecuencia se ve como un parámetro regional que depende de factores climáticos y geológicos.

El principal interés hidrológico en los mapas de uso de suelo radica en la modelación de la infiltración como una función de las propiedades del suelo. La determinación de los parámetros de infiltración a partir de las propiedades del suelo requiere algún tipo de reclasificación de las unidades del suelo en parámetros representativos para el modelo hidrológico. El Soil Conservation Service propuso un criterio para la determinación de la precipitación efectiva en función de la precipitación total y de las características del suelo mediante la clasificación de estos últimos y dio una tabla de valores para el número de curva según el tipo de suelo (US Soil Conservation Service, 1957). Para el caso particular de México, se usó la clasificación hidrológica de la textura del suelo y número de curva dada por Domínguez y Gracia (1981). Con base en este criterio se emplea la ecuación (7) para obtener el escurrimiento generado por una tormenta.

Submodelo del tránsito del escurrimiento

La transferencia de la precipitación efectiva a la salida de la cuenca es una componente interdependiente en el ciclo hidrológico; mientras una proporción de la lluvia se pierde debido a la infiltración, la lluvia en exceso genera el escurrimiento superficial, el cual se acumula y drena por la red de corrientes hacia la salida de la cuenca. El método más empleado para esta transferencia y que fue aplicado en este trabajo fue el del hidrograma unitario (Sherman, 1932).

Para hacerlo, a cada celda de la cuenca se le aplicó la ecuación de continuidad. El cambio en el volumen almacenado en un elemento de la red de drenaje durante un intervalo de

tiempo expresa la diferencia entre el volumen almacenado al final del periodo anterior V_{i_0} y el volumen almacenado al final del periodo siguiente V_{i_1} . El cambio en el almacenamiento V_S es igual a la diferencia entre el volumen que ingresa V_I y el volumen que sale V_O durante el mismo intervalo de tiempo Δt , así:

$$V_S = V_I - V_O = (\bar{I}_t - \bar{O}_t) \Delta t \quad (8)$$

donde \bar{I}_t y \bar{O}_t son los gastos medios de ingreso y salida, respectivamente, durante el intervalo de tiempo Δt . Con ello, el traslado del escurrimiento desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida se modela por medio de una agregación simple a través del hidrograma unitario distribuido o hidrograma unitario de Clark Modificado (Kull y Feldman, 1998).

En la metodología desarrollada en este trabajo se traslada el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida, combinando un mapa de isócronas con un embalse lineal. Se considera, además, que durante las avenidas, la componente más importante del caudal es el escurrimiento superficial, y que el flujo base y el escurrimiento subsuperficial pueden ser despreciados o considerados en el embalse lineal (Vélez, 2001). Maidment (1993) observó la equivalencia de este procedimiento con la aplicación del hidrograma de isócronas en cada uno de los elementos y lo denominó hidrograma unitario distribuido por isócronas (figura 2).

El método de Muskingum se emplea entonces para el tránsito del escurrimiento producido en cada celda con el método del número de curva. El método de Muskingum emplea la ecuación de continuidad (ecuación (8)) y una relación entre el almacenamiento V , y las entradas y salidas del tramo de análisis:

$$V = K[xI + (1-x)O] \quad (9)$$

Donde V es el almacenamiento en el tramo de corriente; I , el caudal de entrada; O , el

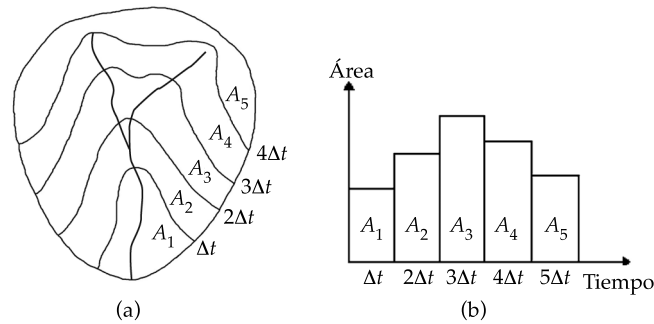


Figura 2. (a) Isócronas y (b) histograma tiempo-área para una cuenca (adaptado de Saghafian *et al.*, 2002).

caudal de salida; K , el coeficiente de atenuación por almacenamiento, y x es un factor de peso que relaciona las entradas y salidas del almacenamiento en el tramo de corriente.

Hidrograma unitario distribuido

Con el fin de emplear también los datos de lluvia obtenidos a partir de radares meteorológicos, el método del Hidrograma Unitario de Clark adaptó nuevas tecnologías para su empleo en modelos hidrológicos distribuidos y su posterior aplicación en pronósticos hidrológicos a tiempo real (Kull y Feldman, 1998). El modelo conceptual de este método, para modelos distribuidos, se muestra en la figura 3.

Este tipo de hidrograma unitario se interpreta como el resultado de la combinación de un proceso de traslación pura, seguido por otro de tránsito en un almacenamiento lineal. De acuerdo con este esquema, el tiempo de viaje real de una partícula de agua es el tiempo dado por el diagrama tiempo-área más el tiempo de retención del embalse lineal (Vélez, 2001).

Este método requirió de la estimación de cuatro parámetros para la determinación del hidrograma de la cuenca: el tiempo de concentración t_c ; un coeficiente de atenuación por almacenamiento K ; la constante de recesión del gasto base R , y un histograma tiempo-área, que para su obtención emplea la infiltración inicial I_a y la infiltración potencial máxima S .

El tiempo de concentración t_c se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto hidráulicamente más remoto. Esta es una medida de retraso puro, sin tomar en cuenta el efecto del almacenamiento (figura 3). En la literatura existen varias ecuaciones (Ponce, 1996) para el cálculo del tiempo de concentración t_c , en este estudio se empleó la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{\bar{S}^{0.385}} \right) \quad (10)$$

donde t_c es el tiempo de concentración (horas), L es la longitud del cauce principal (m) y \bar{S} es la pendiente media de la cuenca.

El coeficiente de atenuación por almacenamiento (K) es el segundo parámetro de este método y es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

Por su parte, la constante de recesión (R) es una medida de la disminución del caudal en la curva de recesión Q_i con respecto al intervalo anterior Q_{i-1} . Es decir:

$$R = \frac{Q_i}{Q_{i-1}} \quad (11)$$

El cuarto parámetro, el histograma tiempo-área, representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca en un tiempo dado. Esta área se obtuvo

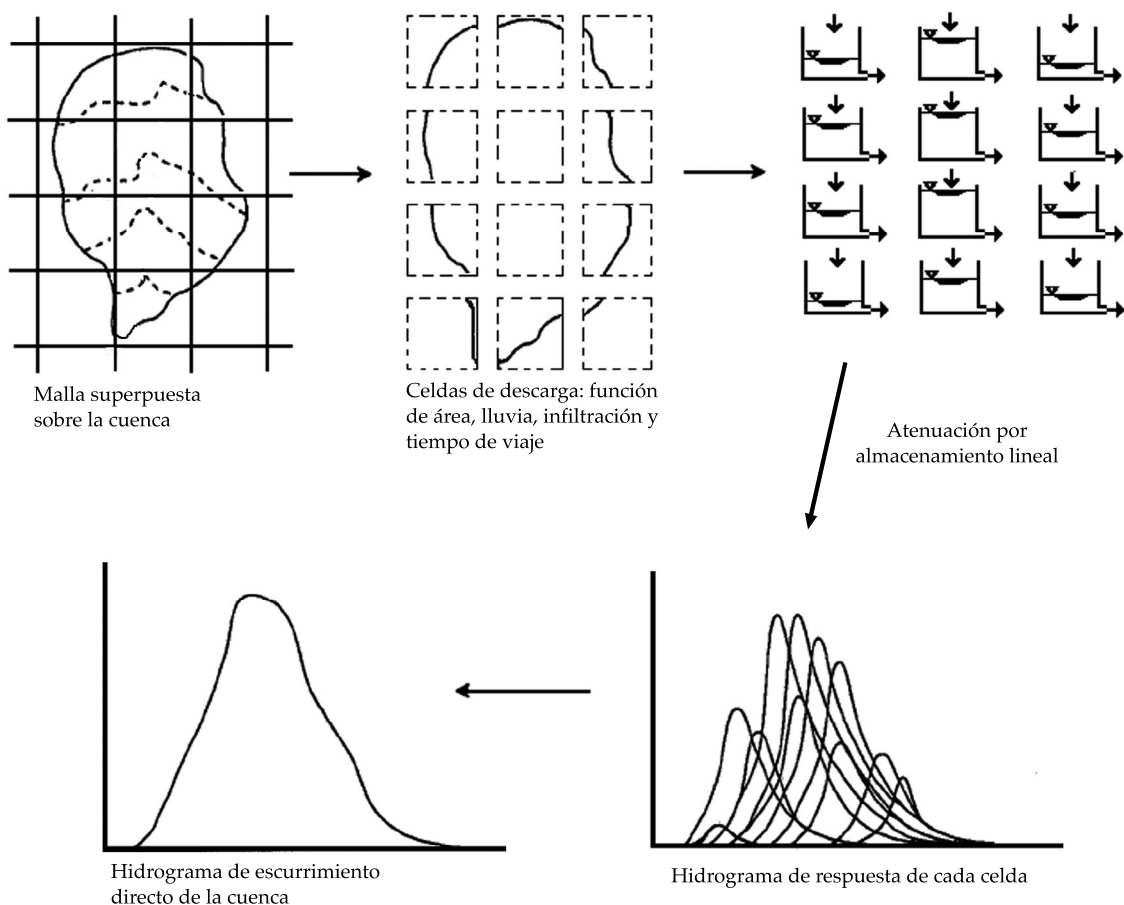


Figura 3. Modelo conceptual del método de Clark para parámetros distribuidos (adaptado de Kull y Feldman, 1998).

al construir el mapa de isócronas mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca, calculado con la ecuación (10). Al relacionar las áreas entre isócronas con el intervalo de tiempo correspondiente, se obtiene el histograma tiempo-área de la cuenca. Este parámetro es muy importante en esta metodología, ya que, junto con la constante de almacenamiento K , refleja la respuesta del escurrimiento de la cuenca hasta su salida (figura 3).

Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado corresponde a la cuenca experimental del río Mixcoac, ubicada en la ciudad de México, México (figura 4).

Mixcoac es un río de montaña, con escurrimientos bajos en periodo de secas y con avenidas súbitas en periodos de lluvia; drena parte de la vertiente de la Sierra de las Cruces ubicada en el suroeste del valle de México. Tiene forma alargada, con orientación sureste-noroeste, con un área drenada de alrededor de 35 km², pendiente media del 30%, aunque muy irregular. Las características primigenias de la cuenca han variado con el paso de los años, por ejemplo en lo que respecta al uso de suelo; sin embargo sigue siendo dominante el bosque (65%) y el uso agrícola (20%). La precipitación media anual es de 1 250 mm, con inicio de la temporada en el mes de marzo, su máximo en el mes de julio y abatimiento en el mes de agosto. Las lluvias se presentan con frecuencia

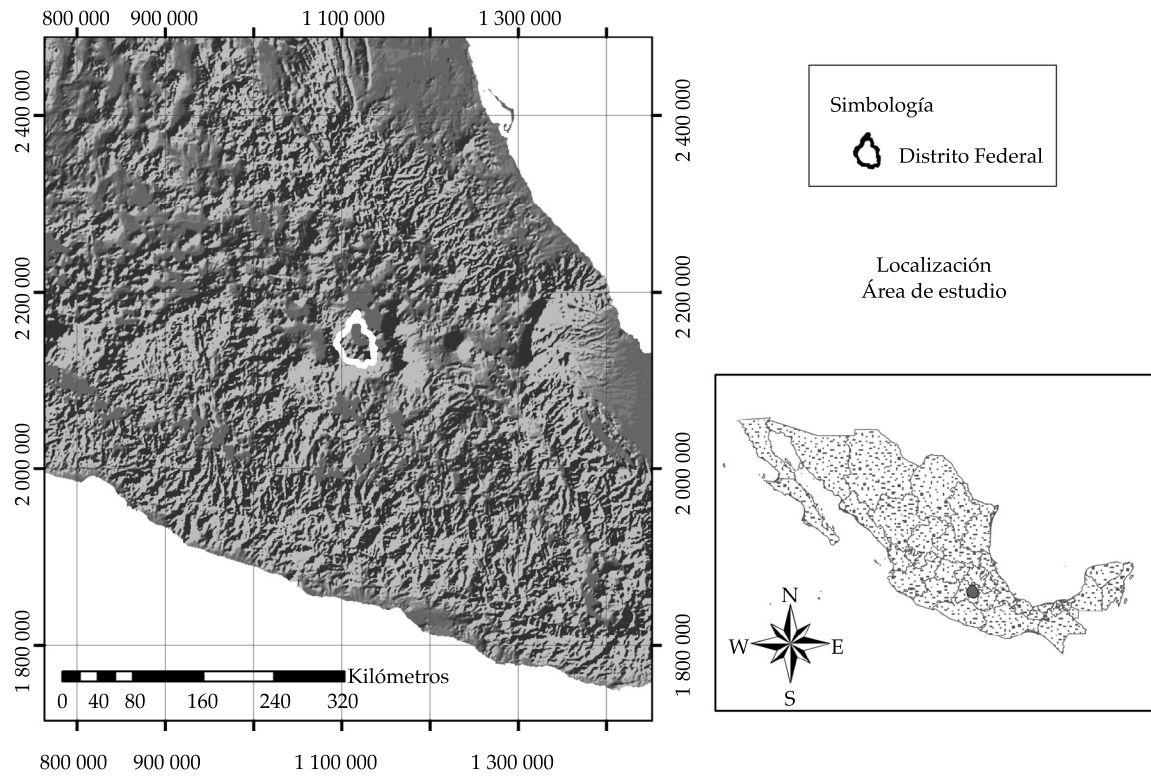


Figura 4. Ubicación de la cuenca en estudio.

en la zona debido a la convección provocada por la orografía del sitio (Magaña *et al.*, 2003). La temperatura media anual depende de la altitud y se encuentra en el rango de los 10 a los 15 °C. Se seleccionó esta cuenca debido a que su tipo de respuesta ocasiona grandes daños, y a que se disponen de datos de escurrimientos y de precipitación estimados con 78 pluviógrafos y con un radar meteorológico, Cerro Catedral, ubicado a 35 km de la cuenca de estudio (figura 5). Esta disponibilidad de datos permitió el establecimiento de una relación entre la lluvia y los escurrimientos que ayudaron a calibrar el modelo hidrológico.

Se dividió a la cuenca en celdas con una resolución espacial de 1 x 1 km, de tal manera que éstas coincidieran con la localización geográfica y fueran igual a la de la malla de las imágenes de radar (figura 5). La malla o matriz de precipitación (Z) obtenida de datos del

radar, a cada uno de los intervalos del periodo de análisis, se estimó a partir de la ecuación de calibración obtenida para este radar en la zona de estudio (Méndez-Antonio *et al.*, 2011):

$$Z = 300 R^{1.3} \quad (12)$$

Donde, como se ha mencionado previamente, R es la intensidad de la precipitación, mientras que Z es el factor de reflectividad del radar. Debe resaltarse que el proceso de calibración del radar es determinante en la calidad de la modelación y supone la existencia de datos pluviométricos en suficiencia para tal fin. En este sentido, la inversión en una red pluviométrica es un paso crítico que habrán de considerar los tomadores de decisión en la evolución hacia modelos operativos a tiempo real (Méndez-Antonio *et al.*, 2010).

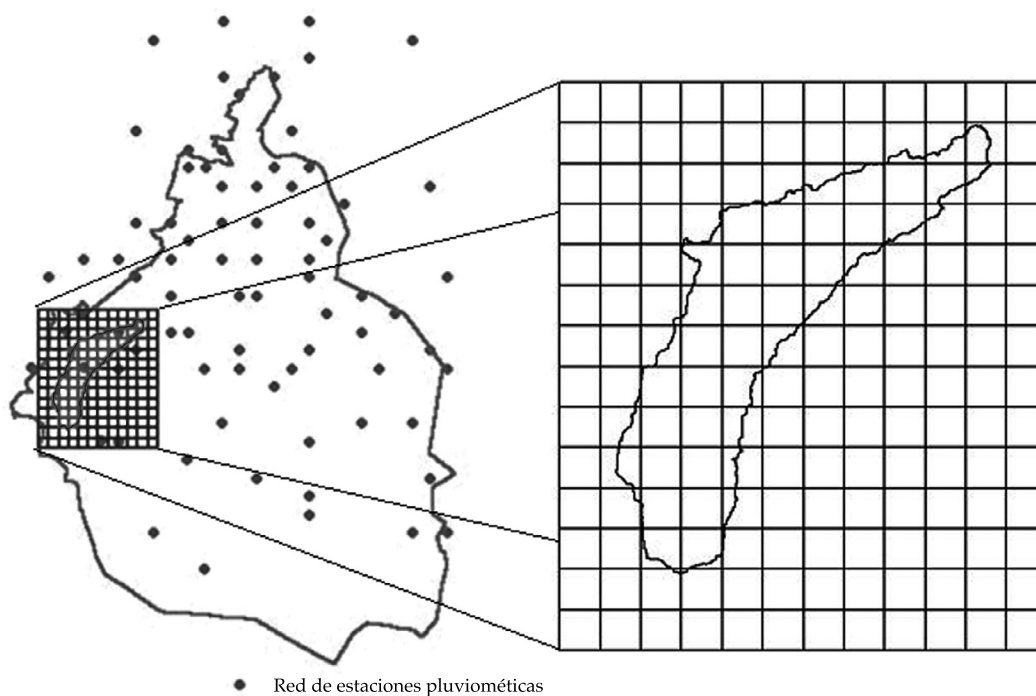


Figura 5. Zona de estudio y malla de precipitación (retícula de 1 x 1 km) del radar meteorológico.

Para calibrar el modelo se seleccionaron las tormentas convectivas del 28 de julio y 23 de agosto de 1998, y se obtuvieron las mallas de precipitación cada 15 minutos. El periodo analizado fue de las 18:00 a las 00:00 para el 28 de julio, y de las 16:45 a las 18:45 h para el 23 de agosto. Las matrices del periodo de lluvia de la tormenta del 23 de agosto de 1998 se muestran en la figura 6, con intervalos de tiempo de 15 minutos. En ellas se observa la evolución de la tormenta desde que se acerca a la cuenca hasta que se disipa. Se seleccionaron estas tormentas debido a que existían datos de precipitación de radar y de escurrimientos a la salida de la cuenca; esto permitía obtener el modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca experimental del río Mixcoac.

Vale la pena aclarar que el modelo hidrológico empleado es del tipo estímulo-respuesta (lluvia-escurrimiento), no del tipo estadístico, como el que se requeriría para tomar en cuenta la variabilidad anual o interanual. Si se considera que los fenómenos que más

producen precipitación son los de verano (intensa precipitación en un corto intervalo de tiempo), este tipo de modelos producen buenos resultados. Los sistemas de invierno se asocian con frentes atmosféricos y nortes. Son sistemas precipitantes no intensos y con periodos más largos (uno o dos días), con predominancia de lluvia estratiforme. En la calibración del modelo presentado en este trabajo, las tormentas seleccionadas fueron de tipo convectivo.

El archivo de parámetros en forma de malla representa las celdas como subcuencas para la modelación distribuida; de esta forma, a partir de la longitud de corriente y pendiente en cada celda, se estimó el tiempo de viaje hasta la salida de la cuenca para crear las isócronas que requiere el método para obtener el histograma tiempo-área y el traslado del escurrimiento (figura 7).

La variación espacial del número de curva (NC) se determinó mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), en formato de

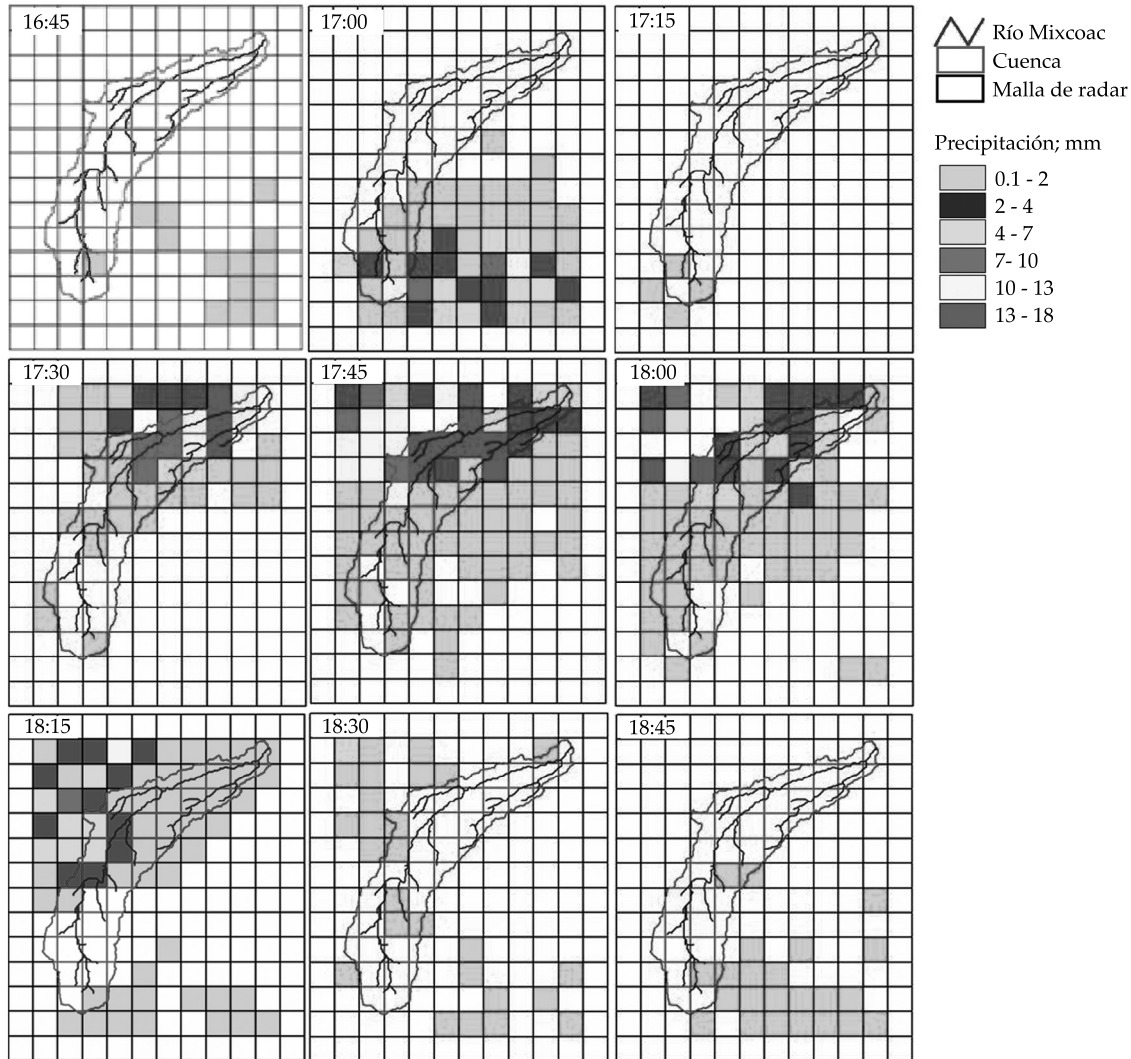


Figura 6. Matrices de precipitación del 23 de agosto de 1998 (16:45 - 18:45 horas).

mapa ráster, verificando que el área de estudio y el formato de datos fuera acorde con la malla de precipitaciones del radar meteorológico del cerro La Catedral. Este formato permite incluir como entrada la malla, con el NC de cada una de las celdas, al modelo de generación del escurrimiento (figura 8c). Para obtener esta malla se usaron los mapas de tipo y uso de suelo (figuras 8a y 8b, respectivamente) de la zona de estudio, clasificando su grado de permeabilidad en Muy Alta (Tipo A), Buena (Tipo B), Media (Tipo C) y Baja (Tipo D), con base en la clasificación de los tipos hidrológicos

del suelo acorde con Domínguez y Gracia (1981).

Finalmente, empleando el método de Clark modificado, se determinó el Histograma Tiempo-Área (HTA) construido con las sub-áreas definidas entre isócronas consecutivas desde la salida de la cuenca hasta la parte más alejada. Este HTA constituye la base de la transferencia de la lluvia en escurrimiento y se determina a partir de la ecuación de convolución. El intervalo de tiempo empleado en el hidrograma de respuesta de la cuenca define el tiempo de viaje entre dos isócronas

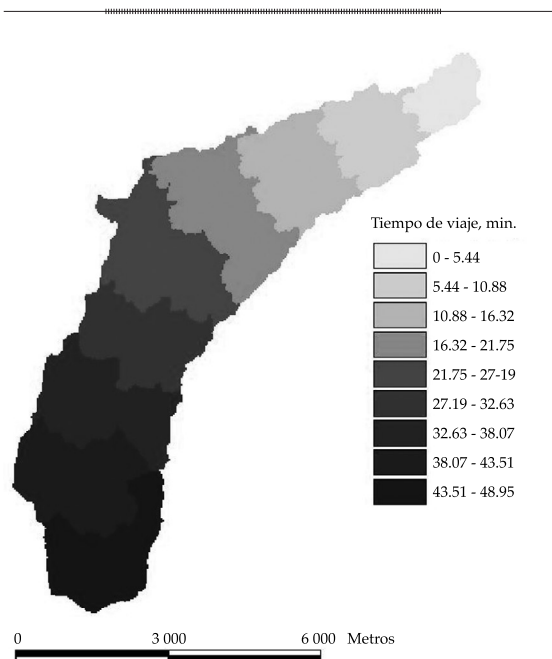


Figura 7. Mapa de isócronas de la cuenca Mixcoac.

la intensidad de lluvia en exceso, y A es el área delimitada entre isócronas. Con este método se calibra el modelo hidrológico hasta que el hidrograma resultante de la estimación sea comparable al hidrograma observado de las tormentas seleccionadas. Los datos de lluvia y escurrimiento observados se emplearon como datos para calibrar el modelo hidrológico.

Calibración de parámetros

El cuadro 1 enumera los siete parámetros que requirió el modelo para su calibración: la infiltración inicial (I_n) y retención potencial (S) están influenciados por la humedad antecedente en el suelo. El tiempo de concentración (t_c) y el coeficiente de almacenamiento (K) influyen sobre la forma del hidrograma. Por su parte, el gasto base inicial (Q_{bi}), la constante de recesión (R) y el umbral del gasto base (Q_u) son parámetros afectados por el flujo base histórico observado. Debe observarse que estos tres últimos parámetros pueden obtenerse de forma directa del análisis histórico, quedando sólo los restantes cuatro para su calibración.

Los parámetros físicos de la cuenca, que pueden considerarse constantes, como el parteaguas, pendientes y tiempo de viaje, se obtuvieron con el *software* HEC-GeoHMS. Los

adyacentes y se define, según Saghafian *et al.* (2002), como:

$$Q_j = \sum_{i=1}^j E_i A_{j-i+1} \quad (13)$$

Donde j es el número de intervalos de tiempo; Q , el gasto a la salida de la cuenca; E ,

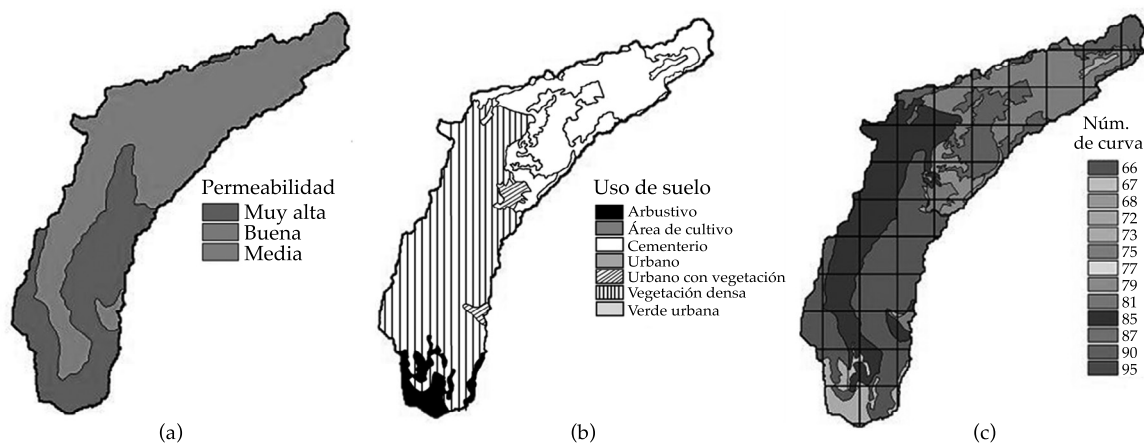


Figura 8. (a) Mapa de tipo hidrológico; (b) mapa de uso de suelo; (c) número de curva de los suelos en la cuenca del río Mixcoac.

Cuadro 1. Parámetros resultantes para cada una de las tormentas.

Fecha	Parámetros del modelo de cuenca						
	I_a (cm)	S (cm)	t_c (h)	K	Q_{bi} (m ³ /s)	R	Q_u (m ³ /s)
28 julio 98	0.6	0.125	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1
23 agosto 98	0.6	0.41	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1

parámetros variables se determinaron con el *software Modelo de Pronóstico de Esguerrimiento MPE* (Domínguez et al., 2008), creado ex profeso pensando en un modelo hidrológico operativo futuro, y con la intención de motivar el uso de los radares y de los modelos hidrológicos distribuidos. Este *software* es completamente gratuito y se encuentra a disposición de la comunidad académica interesada en los modelos hidrológicos distribuidos. El *software MPE*, junto con su manual, puede bajarse de la liga del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México: <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarpublicacion.aspx>

La bondad de dicho modelo se ha probado en otras cuencas de México (informes de proyecto, circulación restringida, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México) y comparado su desempeño con el modelo distribuido de Clark Modificado del *HEC-HMS* (US Army Corps of Engineers, 2001) con buenos resultados.

Resultados

Con la metodología descrita se procedió a la simulación hidrológica de los casos de estudio y los resultados principales se muestran en la figura 9. En ella, además de los hidrogramas estimados a partir de datos de radar y los observados por la estación hidrométrica, se presentan los hietogramas de precipitación total en la parte superior y la infiltración estimada.

Debe resaltarse que al considerar la variabilidad espacial se aprecia una variación

en la infiltración, lo cual no se obtendría con un modelo agregado. Para los casos de estudio analizado, la infiltración inicial (I_a) y la retención potencial de la humedad del suelo (S) se calibraron considerando los volúmenes de escurrimiento presentes en los hidrogramas observados y se pudo ver que sólo en el segundo caso existe una variación de una tormenta a otra, debida principalmente a los cambios en la humedad antecedente. Para las tormentas seleccionadas, los parámetros de infiltración mostraron que, para la tormenta del 28 de julio, la infiltración fue menor que en el caso de la tormenta del 23 de agosto. Esto es un indicativo de que cuando ocurre la segunda tormenta, la humedad del suelo es menor que en la primera.

Para el evento del 28 de julio, la diferencia en volumen entre el hidrograma medido y el observado fue de 5%; para el evento del 23 de agosto, la diferencia fue del 1%; mientras que el pico ocurre en el primer caso con un retraso de 30 minutos; y en el segundo, con un anticipo de 30 minutos. Esta diferencia en volúmenes y el tiempo se debe a la escasa información disponible para calibrar el modelo. La respuesta del modelo mejorará si se dispone de una mayor cantidad de eventos para su calibración, lo cual será factible una vez crezca la infraestructura de monitoreo disponible.

Conclusiones

Los modelos distribuidos, como el aquí descrito, permiten considerar la variabilidad espacio temporal de las tormentas y la variabilidad espacial de las características del

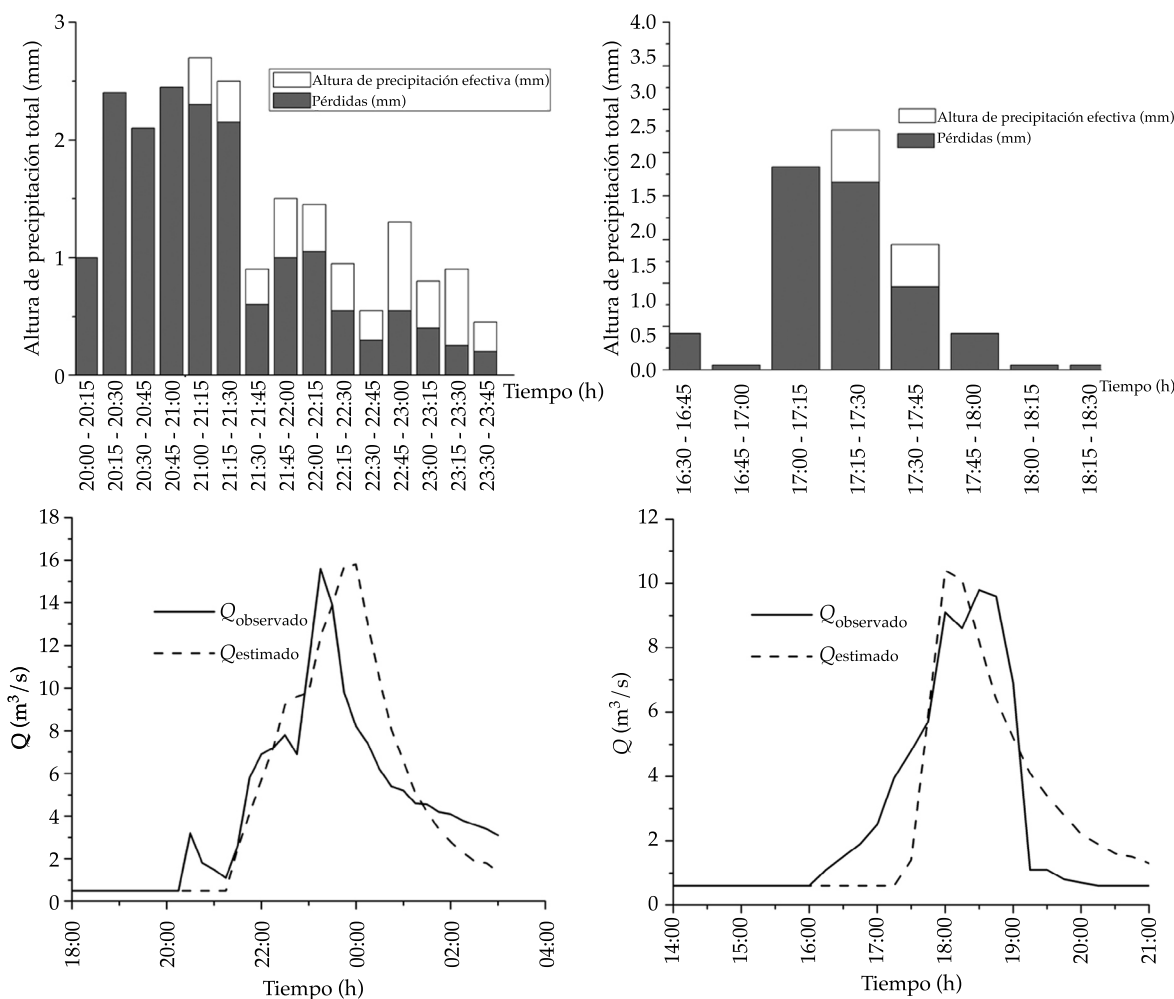


Figura 9. (a) Hidrograma de salida e hietograma para la tormenta del 28 de julio de 1998; (b) hidrograma de salida e hietograma para la tormenta del 23 de agosto de 1998.

suelo de la cuenca, lo que permite simular un hidrograma más acorde con la realidad y con mayor sentido físico.

En este sentido, el radar meteorológico se convierte en una buena opción para estimar la variabilidad espacial de la precipitación que afecta los procesos hidrológicos dentro de una cuenca y que influye en su respuesta. El radar tiene la capacidad de detectar la distribución espacial de la lluvia a niveles de resolución ideales para modelos hidrológicos. Esta ventaja es significativa, sobre todo en zonas de escasa información pluviométrica,

y representa una alternativa para entender el comportamiento hidrológico a escala regional en zonas pobremente instrumentadas.

Estos resultados demuestran la factibilidad del uso del radar meteorológico en el proceso de simulación del proceso lluvia-escurrimiento con un modelo de parámetros distribuidos, y hacen ver las ventajas de emplear el radar como parte de un sistema de alerta a tiempo real contra inundaciones, ya que el tiempo de simulación es menor a la ventana de pronóstico, dejando tiempo para la toma de decisiones. Para el caso de estudio se

observó que para las tormentas analizadas se reprodujo de manera adecuada el hidrograma de salida. Para la tormenta del 28 de julio se subestimó el volumen de escurrimiento en 6% mientras que el gasto pico se subestimó en 1.3%, con un desfase de 45 min y un tiempo base de 5 h para una duración efectiva de 2 h 45 min. Para la tormenta del 23 de agosto, el volumen de escurrimiento se sobrestimó en apenas 2%, mientras el gasto pico se subestimó en 6%, con un desfase de 30 min y un tiempo base de 4 h, para una duración efectiva de 30 min. De estas observaciones se abre una ventana de oportunidad de acción importante en ambos casos, al comparar las duraciones efectivas respecto de los tiempos pico y base del hidrograma de escurrimiento. En cuencas semiurbanas como la del río Mixcoac, este tipo de modelación es relevante en la toma de decisiones orientadas a la mitigación de riesgos hidrometeorológicos, y la salvaguarda de las personas y sus bienes. Es importante recalcar que esta ventana de pronóstico puede aumentarse si se aprovechan las características del radar para obtener pronósticos de precipitación a plazo inmediato (*nowcasting*). Este es un producto muy valioso para zonas con cuencas urbanas y con fuertes pendientes, que tienen una respuesta rápida.

Aunque el uso de esta tecnología es incipiente en México, las políticas públicas orientan a un crecimiento significativo y acelerado en este sector, reduciendo con ello las pérdidas económicas, derivadas por inundación, en las diferentes zonas de nuestro país (figura 1). En esta ruta de modernización habrán de abordarse diversos retos, entre los que se encuentran: la calibración de los radares meteorológicos, en función de valores de reflectividad Z (Méndez-Antonio *et al.*, 2011); el paso a la generación y la implementación de modelos meteorológicos regionales; la inclusión en la estimación de lluvia de datos satelitales y, probablemente el reto conceptual más importante, la evaluación de la humedad antecedente. Cabe la pena enfatizar que lo anterior supone inversiones

significativas en nuevas tecnologías de información y recopilación de información de carácter hidrometeorológico, además de que la modelación distribuida basada en radar no sule a las redes de monitoreo en superficie. Por el contrario, esta modelación requiere de una red de monitoreo en superficie con la densidad adecuada para la calibración del modelo basada en la reflectividad (Méndez-Antonio *et al.*, 2006).

Agradecimientos

A la Comisión Nacional del Agua (Conagua), a través del Servicio Meteorológico Nacional y al Gobierno del Distrito Federal, a través del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, por los datos proporcionados y los proyectos financiados para lograr el desarrollo y la implementación de modelos hidrológicos distribuidos a partir de datos de radar meteorológico. A la Organización Mundial de Meteorología y a la Conagua, por el apoyo en estudios referentes al manejo de los recursos hídricos y prevención de desastres.

Recibido: 04/10/12
Aceptado: 30/05/13

Referencias

- APARICIO, F. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F.: Limusa.
- BEVEN, K.J. Distributed models. In: *Hydrological forecasting*. Anderson, M.G. y Burt, T.P. (editors). Chichester: Wiley, 1985.
- CENAPRED. *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2008*. Citado 11 de octubre de 2012. México, D.F.: Secretaría de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2012, 636 pp. Disponible para *World Wide Web*: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/consultas/consulta2.html>.
- CENAPRED. *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010*. Citado el 11 de octubre de 2012. México, D.F.: Secretaría de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2012, 636 pp. Disponible para *World Wide Web*: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/consultas/consulta2.html>.
- CONAGUA. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008, 158 pp.

- CONAGUA. *Agenda del Agua 2030*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011, 66 pp.
- DOMÍNGUEZ, R. y GRACIA, J. A.1.4. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Pérdidas*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 1981.
- DOMÍNGUEZ, R., ESQUIVEL, G., MÉNDEZ, B., MENDOZA, A., ARGANIS, M.L. y CARRIZOSA, E. *Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008, 89 pp.
- FAURES, J.M. GOODRICH, D.C. WOOLHISER, D.A., and SOROOSHIAN, S. Impact of small-scale rainfall variability on runoff Modeling. *Journal of Hydrology*. Vol. 173, 1995, pp. 309-326.
- FREVERT, D.K. and SINGH, V.P. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Chelsea, USA: WRP, 2002, 914 pp.
- GUICHARD, D., GARCÍA R., FRANCÉS, F., DOMÍNGUEZ, R. Influencia de la Variabilidad Espacio-Temporal de la Lluvia Mediterránea en la Respuesta Hidrológica en Cuencas Pequeñas y Medianas. *Memorias: XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Paolo, Brasil, 2004.
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos Trans*. Vol. 14, 1933, pp. 446-460.
- KULL, D.W. and FELDMAN, A.D. Evolution of Clark's Unit Graphs Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 3, 1998, pp. 9-19.
- LASTORIA, B. *Hydrological Processes on the Land Surface: A Survey of Modelling Approaches*. Trento, Italy: Universidad de Trento, 2008.
- MAGAÑA, V., PÉREZ, J., and MÉNDEZ, M. Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional*. Vol. 41, 2003, pp. 247-259.
- MAIDMENT, D.R. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. *Proceeding of HydroGIS'93*. Viena, Austria: IAHS Publ. No. 211, 1993 (citado por Saghafian, 2002).
- MÉNDEZ-ANTONIO, B., DOMÍNGUEZ, M., MAGAÑA, R., CAETANO, E., and CARRIZOSA, E. Hydrological calibration of meteorological radars. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XXI, No. 4, October-December, 2006, pp. 43-64.
- MÉNDEZ-ANTONIO, B., DOMÍNGUEZ, R., SOTO-CORTÉS, G., MAGAÑA, V., CAETANO, E. Radars, an Alternative In Hydrological Modeling. *Lumped Model. Atmósfera*. Vol. 24, 2011, pp. 157-171.
- MÉNDEZ-ANTONIO, B., SOTO-CORTÉS, G., RIVERA-TREJO, F., GUAYCOCHEA-GUGLIELMI, D. y CARRIZOSA-ELIZONDO, E. *Hacia la implementación de un modelo hidrológico operativo con fines de alerta contra inundaciones*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, noviembre, 2010.
- MORIN, J., ROSENFELD, D., and AMITAI, E. Radar rain field evaluation and possible use of its high temporal and spatial resolution for hydrological purposes. *Journal of Hydrology*. Vol. 172, 1995, pp. 275-292.
- ONU. *Cómo desarrollar ciudades más resilientes, un manual para líderes de los gobiernos locales*. Ginebra, Switzerland: Organización de las Naciones Unidas, 2012, 103 pp.
- ONU. *Vivir con el riesgo, informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. New York, USA/Ginebra, Switzerland: Organización de las Naciones Unidas, 2004, 139 pp.
- ONU. *Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2011. Revelar el riesgo, replantear el desarrollo*. Devon, United Kingdom: Organización de las Naciones Unidas, 2012. 190 pp.
- PONCE, V.M. *Engineering Hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall, 1996.
- PONCE, V.M. and HAWKINS, R.H. Runoff curve number: has it reached maturity? *Journal of Hydrology Engineering*. Vol. 1, 1996, pp. 11-19.
- PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. *Sexto Informe de Gobierno* [en línea]. México: Servicio de Internet de la Presidencia, 2012 [citado el 01 de octubre de 2012]. Disponible para *World Wide Web*: http://www.informe.gob.mx/sesto_informe.html.
- SAGHAFIAN, B., JULIEN, P., and RAJAIE, H. Runoff Hydrograph Simulation Based on Time Variable Isochrone Technique. *Journal of Hydrology*. Vol. 261, 2002, pp. 193-203.
- SHERMAN, L.K. Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News-Record*. Vol. 108, 1932, pp. 501-505.
- SMITH, M. NOAA Technical Report NWS 45. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2004.
- UNISDR. Reducción del riesgo de desastres: un instrumento para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio, Kit de Cabildeo para Parlamentarios. Ginebra, Switzerland: United Nations International Strategy For Disaster Reduction and Unión Interparlamentaria, 2010, 53 pp.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, V. 2.1*. EU: Hydrologic Engineering Center, 2001.
- US SOIL CONSERVATION SERVICE. *National Engineering Handbook*. Sec. 4, Supplement A, Hydrology, Washington, D.C., 1956.
- VÉLEZ, J. *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de Crecidas*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2001, 266 pp.
- VIEUX, E.B. Distributed Hydrologic Model Using GIS. Kluwer Academic Publisher. *Water Science and Technology Library*. Vol. 38, 2001, 293 pp.

Dirección institucional de los autores

Dr. Baldemar Méndez-Antonio

Profesor investigador
Universidad de Sonora
Cerrada de los Escudos 1, colonia Real de Montejó
83224 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (662) 2165 942
baldemar.mendez@industrial.uson.mx

Dr. Gabriel Soto-Cortés

Profesor investigador
Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco
Av. San Pablo 180, colonia Reynosa Tamaulipas
Azcapotzalco
02200 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5318 9065, extensión 114
gsc@correo.azc.uam.mx

Dr. Fabián Rivera-Trejo

Profesor investigador
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Av. Universidad s/n
Col. Magisterial, Zona de la Cultura, Centro
86100 Cunduacán, Tabasco, MÉXICO
Teléfono: +52 (993) 3581 500, extensión 6578
jose.rivera@daia.ujat.mx

Dr. Ernesto Caetano

Profesor investigador
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior s/n
Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5622 4240, extensión 45459
caetano@unam.mx