

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
2 al 5 de octubre de 2002, Ciudad de La Habana

**Aplicación del modelo hidrológico distribuido HIDRAS a una cuenca con
avenidas súbitas. Caso: Río Santa Catarina, Nuevo León (México)**

Nabil Mobayed K.* , Guadalupe E. Fuentes M.** , Baldemar Méndez A.**
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro*

nabil@sunserver.dsi.uaq.mx

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México**

GFuentesM@iingen.unam.mx, bma@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

Se probó el modelo hidrológico distribuido HIDRAS en la cuenca del río Santa Catarina, Nuevo León (México), aprovechando la información espacial disponible. La aplicación supone necesariamente una mejora en el entendimiento y representación de los procesos físicos y parámetros determinantes asociados al fenómeno de escurrimiento, especialmente cuando se trata de cuencas con respuesta súbita. El desarrollo del modelo distribuido involucra el manejo de cartas temáticas que contienen las características físicas de la cuenca (elevación de terreno, uso y tipo de suelo, red hidrográfica, etcétera), además de información climatológica, cuya habilitación requiere de un Sistema de Información Geográfica con capacidad para manejar gran cantidad de datos geo-referenciados.

ABSTRACT

A distributed hydrological model (HIDRAS) was proven in Santa Catarina river basin, in Nuevo León (Mexico), taking advantage of available spatial information. The application necessarily implies an improvement to understand and represent physical processes through the runoff phenomena determining parameters, especially in river basins with flash flood. The development of distributed model involves thematic maps handling which contain the physical characteristics of the river basin (land elevation, soil type, land use, hydrographic network, etc.), in addition to climatologic information, and its implementation requires of a GIS with capacity to handle great amount of geo-referenced data.

1. GENERALIDADES

La ocurrencia de lluvias intensas sobre una zona puede causar el aumento de los escurrimientos en una red de drenaje. Este aumento, conocido como avenida, puede alcanzar eventualmente grandes dimensiones, provocar daños materiales en las riberas y, en ocasiones, la pérdida de vidas humanas. Para aplicar medidas de prevención o mitigación de los daños causados por las avenidas, es necesario conocer su magnitud, evolución, tiempo y probabilidad de ocurrencia.

Ante la relación causal entre lluvia y escurrimiento, se han desarrollado modelos matemáticos para obtener valores de escurrimiento en cauces a partir de información pluvial. Tales esquemas, conocidos como modelos de lluvia-escurrimiento, se utilizan con fines de simulación y predicción. Con un modelo así, es posible hacer predicciones en tiempo real durante las avenidas, a partir de la información pluvial que simultáneamente se está generando en la cuenca. Naturalmente, el desarrollo que ha tenido lugar en los campos de teledetección y sistemas de información geográfica ha facilitado el manejo de información espacialmente distribuida.

Entre los modelos distribuidos comerciales o reportados en la literatura técnica, destacan los que simulan, con bases físicas, los procesos de producción y transferencia del escurrimiento en una cuenca. Para utilizar estos modelos, se requiere información fisiográfica e hidrometeorológica completa -que nunca se tiene en su totalidad- debidamente calibrada y verificada. En la práctica, obtener información cuantitativa resulta casi siempre difícil y costoso, razón por lo que se recurre a la modelación agregada o cuasi-distribuida. En este caso, se desperdicia o desaprovecha toda la información disponible, ya sea cualitativa, indirecta o cuantitativa, cuya precisión es relativamente baja aunque distribuida geográficamente y, por tanto, susceptible de representar mejor la respuesta hidrológica de la cuenca.

En un modelo hidrológico tradicional, en efecto, se considera que gran parte del escurrimiento pluvial se produce por la precipitación excedente. A esta 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 neta o efectiva. 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. El esquema anterior corresponde a los modelos hidrológicos de parámetros agregados, donde se hacen promedios ponderados tanto de las características fisiográficas como de la precipitación en la cuenca. La modelación hidrológica distribuida, en cambio, considera la variabilidad espacial de las propiedades físicas y la precipitación, al dividir la cuenca en subcuencas o celdas.

En este trabajo, se presenta el desarrollo de un modelo hidrológico distribuido lluvia-escurrimiento que aprovecha al máximo la información disponible e involucra un número de parámetros reducido para caracterizar el comportamiento de la cuenca. El esfuerzo se ha orientado a obtener un esquema ágil y robusto, capaz de generar resultados aceptables bajo condiciones de información limitada o escasa.

El modelo se basa en una discretización del área por microcuencas, llamadas celdas geomorfológicas, cuya función de transferencia se obtiene a partir de una modelación agregada. Los resultados de cada elemento se suman en el sentido del flujo, desde la parte más alta hasta la salida de la cuenca, de modo que se obtenga la simulación de toda la red de drenaje.

La variabilidad espacial se toma en cuenta al dividir la cuenca en áreas mínimas, esto es agrupaciones de celdas reticulares con atributos físicos propios de una microcuenca pero dimensiones mucho más pequeñas que una subcuenca. Cada agrupamiento o celda geomorfológica representa un cauce y produce un hidrograma de salida que se agrega en su confluencia a la red de drenaje; luego, es transitado a través de canales o embalses hasta nuevas confluencias, donde se agregan los escurrimientos procedentes de otras microcuencas, a fin de llevarlos secuencialmente hasta la salida general del sistema.

La aplicación de un modelo así es favorable en el caso de cuencas súbitas, donde la morfología de la cuenca y forma de precipitación son determinantes para explicar su comportamiento (con tiempos de concentración pequeños, cambios de pendiente abruptos y recorridos cortos que concentran volúmenes de escurrimiento significativos), difícil de reproducir en todo caso con la ayuda de modelos agregados que basan su fiabilidad en la caracterización de eventos más comunes (con mayor significancia estadística).

2. MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS

2.1 Procesamiento de información geográfica

El cálculo para determinar el hidrograma de escurrimiento, con un modelo hidrológico, se puede realizar por medio de una función de transferencia. La función más utilizada es el hidrograma unitario aunque algunos modelos emplean, para el traslado del escurrimiento a través de los cauces, un tránsito de tipo hidrológico o uno de tipo hidráulico.

Un gran número de modelos, concebidos inicialmente como agregados, han sido adaptados como distribuidos, simplemente considerando subcuencas (áreas más pequeñas) como unidad de análisis, y superponiendo y transitando el escurrimiento producido en éstas para obtener la respuesta de la cuenca completa. Al calcular el escurrimiento a nivel subcuenca, se tienen en cuenta cuatro procesos: precipitación, pérdidas, transformación de lluvia excedente en escurrimiento directo y gasto base. Sobre la subcuenca, se considera que cada proceso ocurre uniformemente, y por tanto que responde a tal escala como un modelo agregado.

Una de las herramientas empleadas para procesar información distribuida son los sistemas de información geográfica (SIG), que tienen la capacidad de manejar grandes cantidades de información geo-referenciada, como es en el caso de los modelos hidrológicos de parámetros distribuidos. Para manejar información por subcuencas, por ejemplo, se emplean los conocidos formatos vector y *raster*. El primero representa datos por medio de puntos, líneas y polígonos (**Fig. 1**) y el segundo emplea formato matricial (**Fig. 2**).

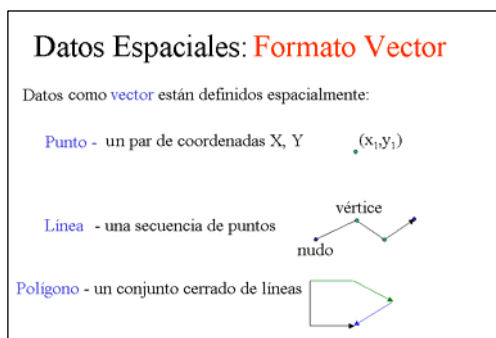


Fig. 1 Información en formato vector



Fig. 2 Información en formato vector y *raster*

La forma de almacenar la información por celdas cuadradas, alineadas como una malla o retícula, recibe el nombre de formato *raster*. Se trata de una estructura comúnmente usada para guardar imágenes de satélite y radar, o los llamados modelos digitales de elevación (MDE). Por eso, algunos modelos hidrológicos se basen en este formato para aprovechar directamente información almacenada bajo una estructura matricial.

Los modelos hidrológicos basados en datos *raster* incluyen: 1) representación de la celda, con sus atributos asociados al centro del elemento: área, pendiente, orientación, longitud, ancho, superficie drenada y otros parámetros asociados; 2) producción del escurrimiento, como una fuente puntual, según balance de agua aplicado al centro de la celda (**Fig. 3**). Este flujo se propaga a otras celdas, aguas abajo, conforme a ocho direcciones posibles (alguno de sus ocho elementos vecinos). Este método, propuesto por Greysukh (1967), utiliza el MDE para inspeccionar celdas adyacentes y calcular la diferencia de elevación con respecto a cada una a fin de encontrar la pendiente mayor y, por ende, la dirección preferencial del flujo (**Fig. 4**). Una vez definidas las direcciones del flujo es posible establecer una secuencia de cálculo para ir acumulando los escurrimientos hacia aguas abajo.

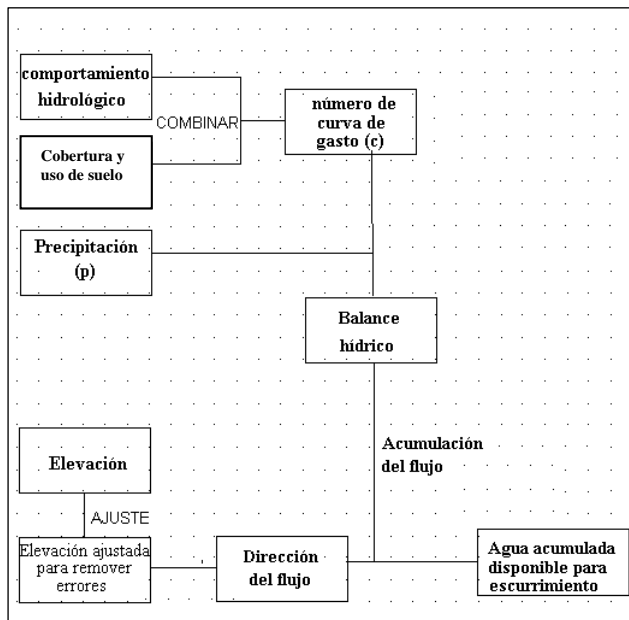


Fig. 3 Modelo conceptual de escurrimiento conforme a la representación de una cuenca por celdas

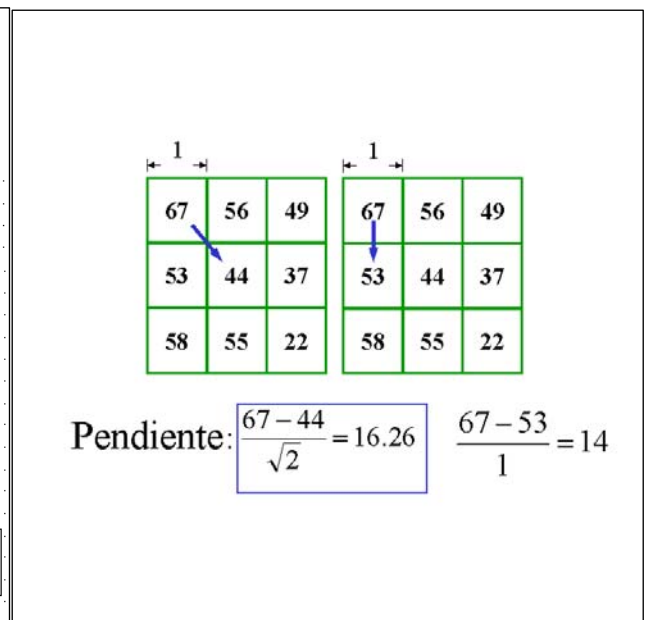


Fig. 4 Revisión de la pendiente para determinar la dirección del flujo

Los mapas temáticos representan las características fisiográficas de la cuenca y se pueden procesar con *software* (bajo SIG) que permite el manejo de la información espacial geo-referenciada contenida dentro de ellos. Los mapas de uso y tipo de suelo son importantes en los modelos hidrológicos distribuidos para evaluar las pérdidas por infiltración; y el MDE y la hidrografía, para definir correctamente trayectorias de flujo y el parteaguas de la cuenca. Por su parte, el mapa de localización de las estaciones pluviográficas (con sus registros) ayuda a definir la distribución espacial de la precipitación.

2.2 Modelo HIDRAS

La base fundamental del modelo hidrológico distribuido HIDRAS es el tratamiento de la información fisiográfica, a partir del MDE y las cartas temáticas de geología, edafología y uso del suelo. Además de utilizar el criterio de direcciones preferenciales de flujo entre

celdas y la acumulación de elementos para configurar la red o sistema de drenaje, según fue explicado, el modelo emplea el programa REDRAS para: (a) editar singularidades características de los MDE (depresiones artificiales o zonas sin drenaje) mediante técnicas de relleno (Martz y Garbrecht, 1993) y dragado (Mobayed, 2001); (b) ordenar los elementos en forma consecutiva, hacia aguas arriba, según la estructura de la red; y (c) cambiar la escala puntual del sistema (elementos reticulares) a escala de microcuenca (celdas geomorfológicas).

El ordenamiento al que se hace referencia, consiste en efectuar un recorrido sistemático por todos los elementos de la red, a partir de su punto de salida (ver **Fig. 5**). Durante este recorrido hacia aguas arriba, deben numerarse ordenadamente las celdas, de modo que los números mayores, respecto a cualquier celda numerada, correspondan siempre a elementos que le preceden en el sentido del flujo (Mobayed y Cruickshank, 1998). Puede advertirse que todos los elementos de la red son recorridos dos veces: la primera, hacia aguas arriba, para asignarle su valor ordinal N_O ; y la segunda, hacia abajo, para identificar confluencias pendientes de recorrer. El proceso termina cuando se ha regresado al punto de salida inicial. Naturalmente, un algoritmo de numeración basado en este criterio puede hacerse extensivo a tramos de conductos o canales.

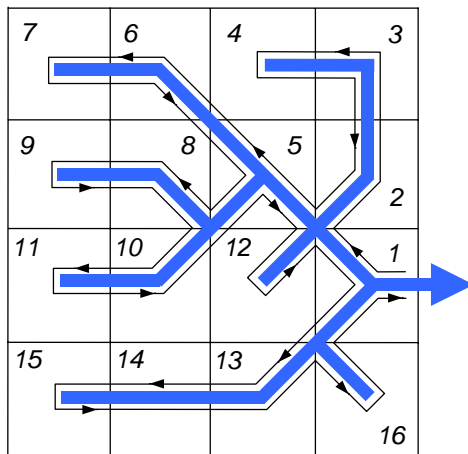


Fig. 5
Red de flujo en un MDE de 16 elementos, cuyo recorrido hacia arriba sirve para asignarles un número de orden consecutivo.

La obtención del número de orden trae consigo varias ventajas. La primera de ellas es que permite determinar el número de elementos drenados por cada celda. En efecto, al realizar el recorrido hacia aguas abajo, durante el ordenamiento, puede guardarse el valor inmediato anterior asignado a una celda no drenada, previa al elemento por recorrer. Así, la diferencia entre dicho valor y el ordinal del elemento resultará equivalente al número de celdas que le preceden:

$$N_D(j) = N_O(j) - N_{fin}(j) \tag{1}$$

donde $N_D(j)$ es el número de elementos drenados hasta la celda j , $N_O(j)$ su número de orden, y $N_{fin}(j)$ el último número de orden asignado a una celda de inicio, al momento de recorrer j hacia aguas abajo. Es fácil comprobar que los valores N_O y N_D son elementos suficientes para hacer una caracterización topológica completa de la red de drenaje, pues

$$N_D = 0 \quad \text{líneas divisorias o parteaguas} \tag{2}$$

$$N_D > N_{REF} \quad \text{red de drenaje} \tag{3}$$

El valor N_{REF} es un número de referencia, útil para visualizar los cauces según su importancia en cuanto a capacidad de drenaje (este valor mínimo se asocia a la denominada

área inicial por drenar o *threshold area*, en inglés). Como se observa, para cualquier celda, los números comprendidos entre N_O y $N_O + N_D$ corresponden invariablemente a las celdas drenadas por ella. Entonces,

$$[N_O(j), N_O(j) + N_D(j)] \quad \text{subcuenca hasta el punto } j \quad (4)$$

Una de las ventajas más importantes que ofrece el ordenamiento de celdas es justamente la posibilidad de hacer un agrupamiento secuencial de ellas, puesto que cada grupo pasa a conformar justamente una microcuenca o celda geomorfológica. Para lograr este simple escalamiento, deben tomarse en cuenta dos criterios básicos:

- a) Iniciando con la unidad y de manera consecutiva, el ordinal es incrementado cada vez que una microcuenca haya acumulado un número mínimo prefijado de celdas, y cuando se encuentre –hacia aguas arriba– una celda que drene un número igual o superior a dicho valor mínimo.
- b) Aquellas celdas que drenan áreas menores a la mínima, debe dárseles el mismo ordinal de microcuenca que se asignó a su celda de salida, numerada con anterioridad gracias al ordenamiento preestablecido.

De esta forma, el ordenamiento de celdas comprende intrínsecamente cualquier arreglo por microcuencas que desee establecerse de manera posterior, con la ventaja de que el ordinal asignado a ellas lleva también el sentido y orden del flujo en la red, siempre hacia aguas arriba.

Otra característica relevante del programa HIDRAS es su capacidad para transitar la precipitación en exceso mediante criterios hidráulicos asociados al escurrimiento en cauces y canales. En principio, se aplica una solución analítica de las ecuaciones de Saint-Venant, simplificadas a la forma de la ecuación analógica de convección-difusión. El resultado es una función del tipo impulso–respuesta que depende de los coeficientes de celeridad y difusión, C y D , y permite transitar directamente las avenidas por un cauce mediante la llamada *integral de convolución* (Ortiz, 2000). De manera resumida, la expresión integral simplificada de las ecuaciones está dada por:

$$Q_j = \sum_{k=1}^j (I_k u_{j-k+1}) \Delta t \quad (5)$$

$$u(t) = \frac{L}{\sqrt{4\pi Dt^3}} \exp\left(-\frac{(L-Ct)^2}{4Dt}\right) \quad (6)$$

En este caso, Q_j es una ordenada del hidrograma de salida asociada al tiempo $j\Delta t$, e I_k la entrada en el tiempo $k\Delta t$. El valor u de la función impulso–respuesta se estima mediante la ecuación (6) para $t = (j-k+1)\Delta t$, la distancia L entre hidrogramas, y para valores medios conocidos de los coeficientes C y D .

Para efectuar un tránsito de avenidas por toda de la red de drenaje, se utiliza la solución presentada, después de haber identificado el sistema de cauces en la cuenca. Cada uno constituirá un elemento de la red y tendrá asociados los datos de: área tributaria (cuenca propia), fracción de área saturada (o humedad precedente), longitud y pendiente del ca-

nal, así como coeficientes propios de celeridad y difusión, *C* y *D*. En primer lugar, deben obtenerse los hidrogramas incipientes que generan las microcuencas endógenas, a partir de la precipitación en exceso, pues constituyen las condiciones de frontera o entradas al sistema. Aquí es donde se consultan los mapas temáticos restantes para ayudar a establecer las condiciones de escurrimiento de cada celda geomorfológica (Mobayed, 2001).

Para los canales ubicados aguas abajo, la entrada corresponde a los hidrogramas de salida generados en los tramos superiores (de hecho, si confluyen varios canales, habrá que sumar sus aportaciones para definir tal entrada). Dichos canales producen su propia salida, resultado del tránsito de la avenida por medio de la ecuación (5) más la generada por cuenca propia. Al final, la acumulación de hidrogramas, hidráulicamente trasladados de los cauces superiores a los inferiores, habrá de definir la variación de el escurrimiento a través de toda la red. La discretización del área permite suponer que cada canal tiene sección y pendiente constante (lo que facilita la elección de sus parámetros). La heterogeneidad, más bien, es inherente al sistema hidrológico en su conjunto.

3. ESTUDIO DE CASO

El río de Santa Catarina nace cerca de Tarillal, lugar situado en la parte sur del estado de Nuevo León (México) a una altura de 2800 msnm y sigue su curso normal a través de su cuenca de 1750.68 km² hasta llegar a la ciudad de Monterrey, situada sobre los 538 msnm. Este desnivel en tan corta longitud (cerca de 85 km) provoca grandes avenidas durante la época de intensa precipitación pluvial (3). Ayuda mucho, a la formación de grandes avenidas, el hecho de que la velocidad adquirida por el agua sea muy grande. Las observaciones directas llevan a la conclusión de que el coeficiente de escurrimiento es grande, atendiendo al tamaño de la cuenca y a las grandes pendientes.

El cálculo de la tormenta de diseño para una obra de control de avenidas en esta cuenca considerada grande (supera los 100 km²), requiere el uso de un factor de reducción por área, para tomar en cuenta que las precipitaciones no se presentan de manera simultánea en cada estación que influye en la cuenca. De las estaciones climatológicas analizadas (**Fig. 6**) algunas tienen pluviógrafo y otras sólo tienen pluviómetro.

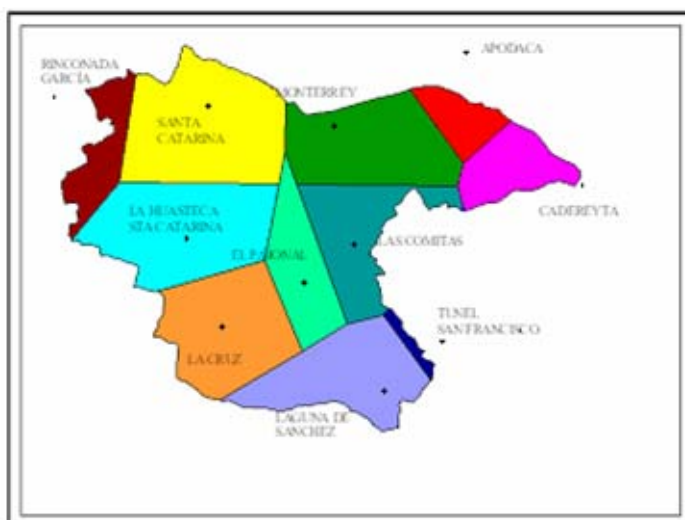


Fig. 6
Ubicación de estaciones climatológicas y polígonos de Thiessen para la cuenca del río Santa Catarina, N.L. (México)

En la **Tabla 1** se lista el nombre, clave, periodo de registro y tipo de aparato de medición de la precipitación pluvial en cada estación climatológica.

Tabla 1. Estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio

Estación	Clave	Periodo de registro (ERIC2)	medición de lluvia Tipo de aparato de
Apodaca, Apodaca	19004	17 /02/1964 a 28/02/1990	Pluviómetro
Cadereyta Jiménez	19008	01/04/1947 al 30/11/1998	Pluviómetro
El Pajonal	19018	01/06/1954 al 01/08/1998	Pluviómetro
La Cruz	19031	2/06/1954 al 30/11/1998	Pluviómetro
Laguna de Sánchez	19033	01/04/1947al 30/11/1998	Pluviógrafo*
Las Comitas	19038	01/04/1942 al 30/03/1986	Pluviógrafo*
Monterrey-DGE	19049	01/01/1940 al 31/10/1986	Pluviómetro
Rinconada Garcia	19054	01/06/1944 al 30/11/1998	Pluviómetro
Santa Catarina	19058	01/12/1944 al 30/11/1998	Pluviómetro
Tunel San Francisco	19062	01/01/1962-31/05/1986	Pluviómetro
La Huasteca Sta. Catarina	19096	01/11/1975 al 30/11/1998	Pluviómetro

Tras observar los valores de precipitación máxima anual, registrados en cada una de las estaciones, se identificaron años que registraron precipitaciones mayores a 100 mm por evento. Las fechas fueron: 21, 22 y 23 de septiembre de 1967 (huracán Beulha) y 16 de septiembre de 1988 (huracán Gilberto). Puesto que los registros corresponden a lluvias máximas en 24 h, fue necesario asignar formas características (regionales) para configurar su hietograma de tormenta.

4. RESULTADOS

El primer objetivo de la aplicación fue preparar el MDE del área, los mapas temáticos de uso de suelo, edafología y polígonos de Thiessen. Con el programa REDRAS, antes descrito, se efectuaron las adecuaciones al modelo digital de elevación y se elaboró la matriz que contiene las direcciones preferenciales de flujo, útil por cierto para construir el llamado mapa de aspecto (**Fig. 7**). Asimismo, este programa sirvió para efectuar el proceso de ordenamiento de celdas, conforme al sentido del flujo, así como el proceso de escalamiento, para discretizar el área en celdas geomorfológicas o microcuencas (**Fig. 8**). En el caso de la cuenca estudiada, se propuso un agrupamiento de 1000 celdas (0.9 km² para elementos cuadrados de 30 m por lado) como criterio para definir el área mínima de drenaje, capaz de formar un cauce incipiente, lo que determinó un total de 1397 microcuencas (ver red de drenaje en la **Fig. 9**).

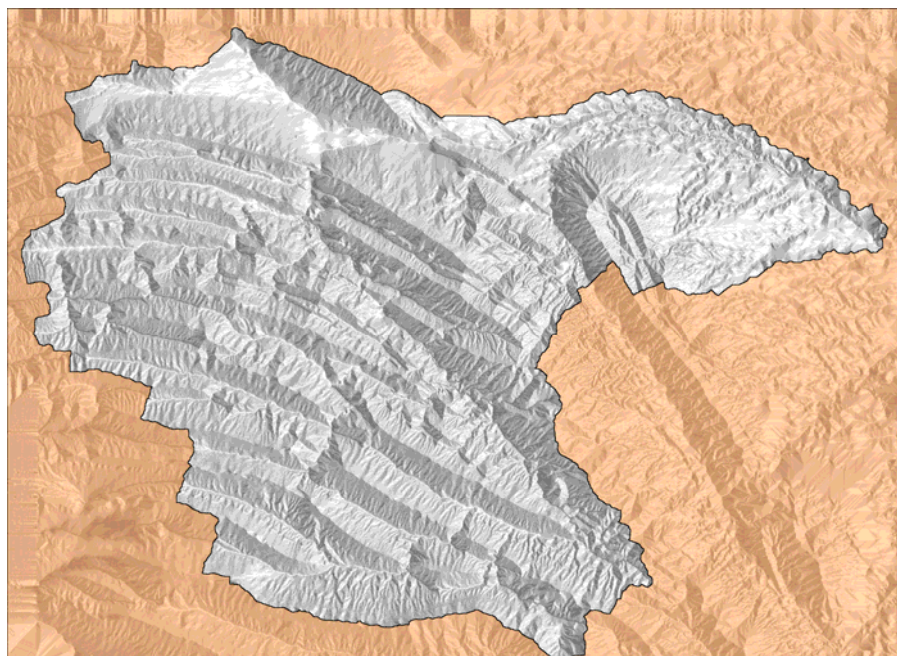


Fig. 7
Mapa de aspecto para la cuenca del río Santa Catarina, N.L. (México)

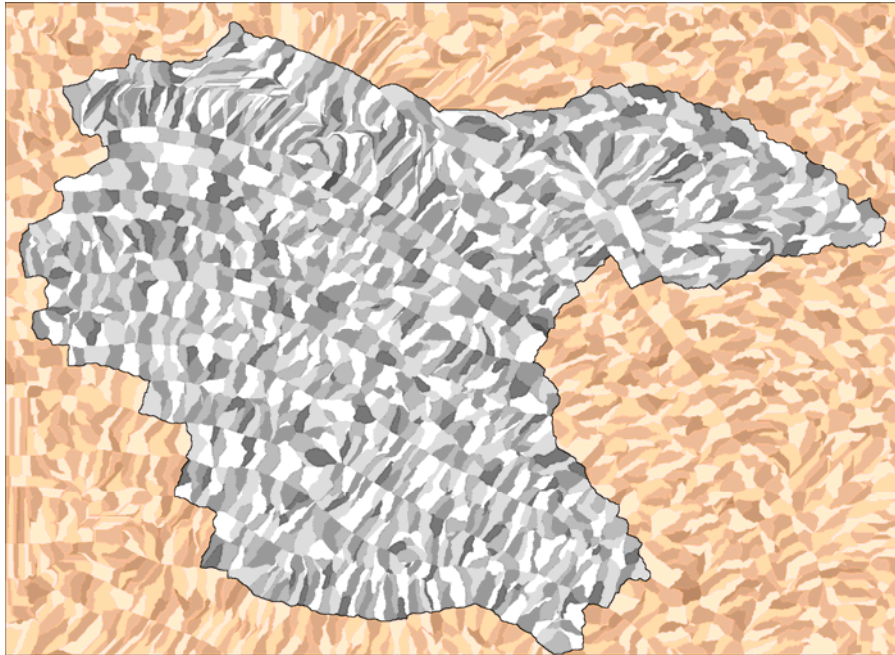


Fig. 8
Escalamiento de la
cuenca del río Santa
Catarina, en celdas
geomorfológicas

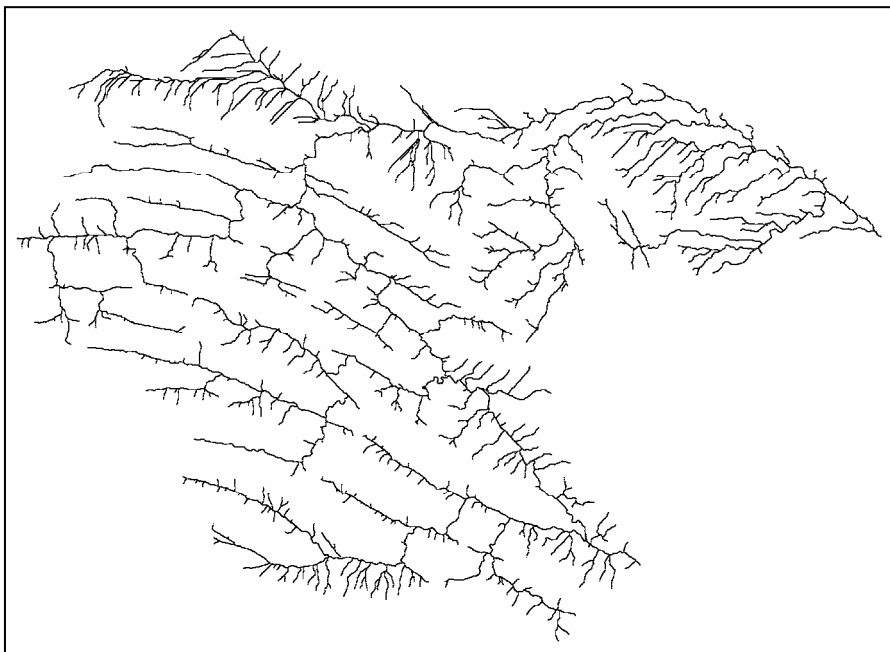


Fig. 9
Red de drenaje de la
cuenca del río Santa
Catarina, N.L.

Con la información de los hietogramas asociados a cada estación climatológica, además de los mapas temáticos y la base de datos formada por REDRAS, se aplicó el modelo distribuido HIDRAS al caso de los eventos meteorológicos previamente señalados. El resultado del hidrograma de escurrimiento directa a la salida de la cuenca, para el caso del huracán Beuhla (21 al 23 de septiembre de 1967), se muestra en la salida del programa de cómputo (**Fig. 10**). Según se puede apreciar, el modelo distribuido representó la ocurrencia de dos picos por cada tormenta (suponiendo que hubiese ocurrido un evento de tormenta por día), como una consecuencia de la acumulación de escurrimientos y tiempo de traslado de las avenidas por todos los cauces de la red de drenaje.

De acuerdo con los resultados, el número de la curva de escurrimiento promedio N para la cuenca fue igual a 77.83 y el coeficiente de escurrimiento C igual a 0.176, valor en efecto significativo para el tipo de cuenca y evento de tormenta estudiado.

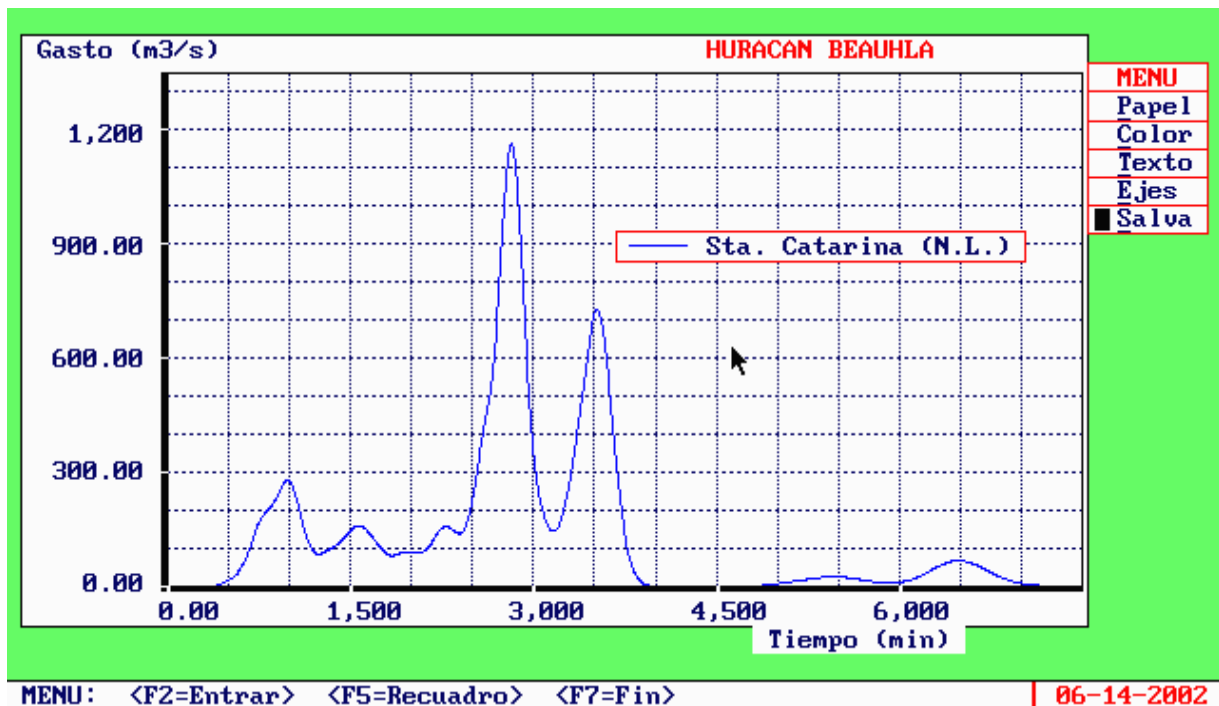


Fig. 10 Hidrograma de escurrimiento directa generado por el huracán Beauhla (1967), en la cuenca del río Santa Catarina, N.L. (México).

5. CONCLUSIONES

La complejidad de las redes de drenaje, en regiones de fuerte pendiente y precipitaciones de importancia, como las de origen ciclónico, obliga a estudiar el fenómeno mediante modelos hidrológicos de parámetros distribuidos que ayudan a entender mejor el proceso de lluvia-escurrimiento. El modelo HIDRAS probó ser una herramienta útil para representar las características fisiográficas de una cuenca, como la del río Santa Catarina (México), y efectuar un escalamiento acorde con su morfología a través de lo que se han llamado *celdas geomorfológicas*. Se determinan así variables físicas reales por cada tramo de la red de drenaje, posibilitando con esto la simulación hidráulica del tránsito de avenidas conforme a la precipitación excedente que se acumula en las áreas de aportación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Greysukh (1967),
- Martz L. W. y Garbrecht J. (1993), *DEDNM: A software system for the automated extraction of channel network and watershed data from raster digital elevation models*, GIS & Water Resources, American Water Resources Association
- Mobayed K. N. y Cruickshank V. C. (1998), *Ordenamiento sistemático de redes de drenaje para la modelación físico-hidrológica*, XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo 1, 10 pp, Oaxaca, México

- Mobayed K. N. (2001), *Modelo distribuido de lluvia-escorrentamiento basado en el manejo de variables geo-referenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas*, tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México
- Ortiz A. F. (2000), *Modelo integral simplificado de las ecuaciones de Saint-Venant para el tránsito de avenidas*, Tesis de grado, Universidad Autónoma de Querétaro, México