

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

POR

JUAN A. CEBRIÁN

Y

JAYANTA K. SIRCAR

Introducción: Enunciado del problema

La formulación de modelos hidrológicos es una tarea importante en el campo de la planificación y explotación de recursos hídricos. Hay un tipo de modelos hidrológicos que simulan una descarga hídrica puntual —o también una serie de flujos—, en función de las características de la cuenca de drenaje: topografía, suelos, usos del suelo, etc. (Miller, 1985). La cuestión primordial en el establecimiento de modelos hidrológicos es la determinación de correlaciones significativas entre los flujos —u otras variables hidrológicas— observados en puntos determinados de la red fluvial, la cantidad de precipitaciones a lo largo del tiempo y las características del terreno de la cuenca correspondiente. Se supone que cuanto más desagregada sea la información, si se dispone de los medios de análisis y control adecuados, más preciso será nuestro conocimiento de las condiciones hidrológicas implicadas.

Juan A. Cebrián. Instituto de Economía y Geografía. CSIC. Madrid.

Jayanta K. Sircar. College of Engineering, University of Maryland. EE.UU.

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

Mediante técnicas estadísticas se puede llegar a la siguiente formulación tipo (Beran, 1982)

$$Q = b^0 A^{b1} R^{b2} S^{b3} D^{b4} U^{b5} P^{b6} G^{b7} L^{b8} \dots$$

en la que Q es una característica de flujo, por ejemplo, una estadística de inundaciones o sequías; A es el área de la cuenca; R es una medida de precipitaciones, por ejemplo, una media de precipitaciones o una medida de su intensidad, o del déficit pluviométrico; S es la pendiente media del lecho fluvial o de la topografía que lo circunda; D es una medida de la densidad de la red fluvial; U es la proporción de suelo urbanizado en la cuenca; P es el porcentaje de cobertura arbórea en la zona; G es un indicador de permeabilidad del suelo; L es un estimador de la superficie afectada por endorreísmo; b^0, b^1, \dots , etc., son parámetros a determinar. No es ésta una lista exhaustiva, además, en la práctica, no todas las variables se requieren para describir una determinada variable de flujo, Q . La finalidad de ecuaciones como esta es predecir Q , la variable hidrológica en cuestión, a partir de las variables $A, R, S, D, U, P, G, L, \dots$, cartografiadas, o cartografiables, en puntos del cauce donde no se dispone de aforos. Se requieren datos para calibrar la fórmula, para estimar los parámetros b^0, b^1, b^2, \dots , etc. Una vez calibrada, la fórmula se puede utilizar en cualquier punto de la cuenca, incluso en aquéllos en los que no se ha recogido información sobre flujos. Estos modelos resultan de gran utilidad para la toma de decisiones, ya que facilitan la simulación del comportamiento de la cuenca bajo condiciones reales, actuales, o hipotéticas.

Los modelos hidrológicos agregados promedian las características de las cuencas en cuestión. En la familia de modelos del Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos, por poner un ejemplo, uno de los parámetros fundamentales es el número de curva ponderado, que refleja la agregación de los tipos de suelo y los usos del suelo. En esta clase de modelos no se presta atención a la variabilidad espacial dentro de cada cuenca. Si la cuenca es suficientemente grande y es necesario tener en cuenta la variabilidad espacial interna, se definen varias subcuencas, concatenando posteriormente sus hidrogramas. En la segunda mitad de la década de los 70 (Ragan y Jackson, 1975; U.S. Army Corps of Engineers, 1978) se demostró que la mayoría de las variables requeridas por este tipo de modelos pueden ser definidas y manipuladas

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

por Sistemas de Información Geográfica (SIGs), a partir de las imágenes digitales procedentes de satélites orbitales, y de otras variables espaciales convenientemente digitizadas. Estas nuevas posibilidades han permitido mejoras significativas en la definición de parámetros y en el funcionamiento de los modelos.

La importancia de la desagregación, o segmentación, en modelos hidrológicos fue ya reconocida, probablemente por primera vez, por Lowdermilk en 1929: «Es evidente que los factores que funcionan en una cuenca amplia son de tal complejidad y están tan correlacionados entre sí que resulta imposible aislar sus efectos recurriendo solamente a medidas de flujo en el cauce fluvial. La evaluación de los elementos del complejo es esencial para entender los fenómenos del ciclo hídrico.» Desde entonces, un buen número de científicos han estudiado los efectos positivos de incluir la variabilidad espacial en la simulación de los procesos de drenaje (Ross y otros, 1978).

Los modelos totalmente desagregados superponen sobre el área de estudio una retícula ortogonal. Cada elemento tiene un valor único por cada característica y es tratado como una pequeña cuenca de dimensiones elementales. La escorrentía procedente de una celda es transmitida a alguna de sus vecinas, y así, sucesivamente, hasta alcanzar una de las celdas pertenecientes a un lecho fluvial.

En los modelos simplemente desagregados el área de estudio es subdividida manualmente en unidades lo suficientemente pequeñas como para que la adopción de la característica dominante como atributo único, en cada unidad, no suponga un grado de simplificación excesivo.

Pero la utilidad de los modelos desagregados depende de la solución eficaz de la adquisición de datos espaciales. Afortunadamente, como hemos comentado más arriba, la información procedente de sensores remotos ha facilitado enormemente la descripción de la variabilidad espacial de las características fundamentales de las cuencas, como, por ejemplo, la cobertura vegetal o la humedad del suelo. Además, en los últimos años se ha permitido el acceso a modelos topográficos digitales —también denominados modelos digitales del terreno— a una comunidad de usuarios realmente amplia.

Los MTD/MDTs son imprescindibles para la confección de modelos hidrológicos totalmente desagregados. Además, también son muy útiles

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

cuando se trabaja con modelos agregados, o con modelos simplemente desagregados, para describir la geometría de la cuenca. Salomonson (1983) ha publicado una interesante relación de características hidrológicas, junto con las variables topográficas, de cobertera y de uso del suelo de las que dependen. Reproducimos, como ejemplo, tres de ellas. En cursiva aparecen las que pueden extraerse directamente del MTD/MDT correspondiente:

Hidrograma temporal:

Longitud de la corriente principal.—Distancia desde la desembocadura al centro.—Pendiente de la corriente principal.—Rugosidad del lecho fluvial.

Proporción escorrentía/precipitación:

Superficie.—Longitud de la cuenca.—Relieve.—Perímetro.

Sedimento anual:

Intensidad de las precipitaciones.—Escorrentía media anual.—Factor de erosión.—Precipitación anual.—Superficie.—Pendiente media.

El elemento fundamental de los modelos desagregados espacialmente es la capacidad de representar la interdependencia que existe en el mundo físico entre la escorrentía, su flujo en forma de retículo tridimensional —definido por la estructura topográfica— y las características del terreno: tipos y usos del suelo, en primer lugar.

Cuando el hidrólogo recurre a un modelo totalmente desagregado asume que éste le proporcionará, al menos, una solución eficiente a las dos tareas que mencionamos a continuación:

1. Definir la altitud, la pendiente y el aspecto de cualquier punto representado en un mapa.
2. Delinear la superficie que drena hacia un determinado punto o segmento de la red fluvial.

A un hidrólogo no le resulta especialmente difícil el dibujar a mano, sobre un mapa topográfico, los bordes de las zonas que drenan hacia segmentos o puntos a lo largo de una determinada corriente. En cambio, la réplica digital de esta operación cartográfica es un problema topológico complejo que permanece sin solución definitiva —como lo demuestran

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

ya más de dos décadas de investigación en la automatización de este proceso.

Nuestra solución al problema de la inclusión de la variabilidad topográfica en los modelos hidrológicos totalmente desagregados parte de la digitización raster de curvas de nivel. A continuación se convierte esa imagen raster en una matriz de altitudes (MTD/MDT). Finalmente, se acomete la definición de las rutinas que posibilitan la manipulación del MTD/MDT y su segmentación en cuencas y subcuencas.

Estado de la cuestión

Los modelos de delineación de cuencas a partir de MTD/MDTs pueden ser clasificados en tres categorías: 1) los que extraen del MTD una colección de puntos singulares, que posteriormente serán amalgamados para formar regiones singulares; 2) los que fragmentan el MTD recurriendo a la simulación del proceso de drenaje de cuencas; 3) los que consideran a la vez la digitización de la topografía (MTD) y la digitización de la hidrografía. Estos tres tipos fundamentales pueden luego combinarse entre sí, dando lugar a soluciones más complejas. En lo que resta del artículo nos referiremos a estas categorías en los siguientes términos: la solución geométrica (1), la simulación de los procesos de drenaje (2) y la solución pragmática (3).

Comentamos en primer lugar los trabajos del tercer grupo, porque la primera publicación sobre automatización de delineación de cuencas (Sprunt, 1972) pertenece a él.¹ También, porque nuestra solución es mucho más cercana a los métodos del tercer grupo que a los de cualquiera de los otros dos.

La solución pragmática.—El primer algoritmo de disección de cuencas fluviales de que se tiene noticia fue publicado por Sprunt en 1972. En realidad se trataba de un algoritmo de conexión de píxeles ladera arriba, a partir de un determinado segmento fluvial.

¹ Peucker y Douglas (1975) citan un trabajo previo de Shepard (1968): el programa WATERSHED. Este programa era capaz de delimitar cuencas recurriendo a un algoritmo de «ascensión de cumbres». La solución de Shepard pertenece al primer y/o segundo grupo de métodos de nuestra clasificación.

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

Once años más tarde Fellows condujo una serie de experimentos para dilucidar el papel de la resolución —su tamaño de celda— del MTD utilizado en los resultados de simulación de comportamiento de cuencas. Fellows recurrió a los MTDs producidos y distribuidos por el USGS y redactó un procedimiento inspirado en el método de Sprunt. El algoritmo de Fellows delineó 257 cuencas usando cinco tamaños de celda diferentes. Fellows comprobó que los MTDs del USGS contenían, con frecuencia, depresiones artificiales, sobre todo a lo largo de canales fluviales con amplias riberas inundables. Consecuentemente, observó que era necesario un filtrado a conciencia de estos MDTs para ajustarse a las condiciones ideales de superficie topográfica que Sprunt había definido como requisito para poder detectar píxeles ladera arriba. Además, Fellows demostró que, si no se identifica cuidadosamente en el MTD la desembocadura de cada uno de los segmentos fluviales en cuestión, la segmentación resultante puede ser claramente errónea.

En 1984 Flewelling presentó otra solución en esta línea, cuyo primer paso era claramente geométrico. Efectivamente, Flewelling realiza una clasificación binaria del MTD: las celdas que son clasificadas como pertenecientes a una meseta o a una divisoria de aguas reciben el valor «0», y las restantes celdas, celdas de valle, son etiquetadas con el valor «1». A continuación, un operador define cuáles son los sumideros de las cuencas del MTD. A partir de éstos, ladera arriba, se propagan las etiquetas asignadas previamente a cada uno de ellos, hasta toparse con una celda no clasificada como celda de valle.

El método que publicaron Marks y otros (1984) es muy semejante. En este caso, la clasificación de las celdas del MTD es sustituida por el cálculo de la pendiente y el aspecto de cada una de ellas. A continuación, el procedimiento pregunta por la localización de los sumideros de las distintas cuencas y los etiqueta inequívocamente, marcando las celdas vecinas y las vecinas de los vecinos, siempre que su aspecto apunte hacia una celda asignada ya a una determinada cuenca. Solamente cuando el terreno es tan horizontal que su aspecto resulta indefinido, el programa presta atención a la pendiente de las celdas para clasificarlas en la cuenca de la vecina que se encuentre en la dirección de la pendiente más acusada.

El trabajo de Miller (1985) partió de la consideración conjunta del MTD y de la hidrografía. La función marker (MTD) genera la matriz LDOF en la que se almacena la dirección local (es decir, la dirección dentro

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

de cada celda del MTD) del flujo de esorrentía. La función *rmigen* (hidrografía) crea la matriz *RHYDRO* que es una versión raster de la red hidrográfica, tal que cada celda que es cruzada por un segmento de corriente de agua superficial almacena el identificador numérico de ese segmento y la distancia aproximada de la celda al extremo del segmento al que apunta la dirección del flujo. La función *router* (*LDOF*, *RHYDRO*) produce la matriz de puntos de entrada, *POE*, que almacena en cada celda dos valores: el primero, la distancia de su punto de entrada en la red fluvial —el punto de entrada del flujo no canalizado correspondiente a la celda— al extremo inferior del segmento fluvial correspondiente; el segundo, el identificador numérico de dicho segmento. Este conjunto de datos, originales y derivados, permite la aplicación de modelos hidrológicos totalmente desagregados.

Finalmente, situamos el trabajo de Hutchinson (1988) en este grupo porque supuso un tratamiento casi exhaustivo de los problemas relacionados con la segmentación de cuencas hidrológicas: un trabajo casi exhaustivo es un trabajo pragmático ¿no es así? El principal objetivo de Hutchinson es la interpolación de un MTD que sea consistente desde el punto de vista hidrológico. No obstante, su trabajo resulta claramente relacionado con el de la delineación automática de cuencas. Los programas de Hutchinson generan MTDs a partir de puntos singulares de la superficie topográfica, de curvas de nivel y, si están disponibles, de cursos fluviales digitizados. Las dos innovaciones de este procedimiento son la remoción de las depresiones locales espúreas y las rutinas que calculan automáticamente las líneas de cumbres y los cursos fluviales a partir de los puntos de curvatura máxima de las isolíneas. Este cálculo automático de las divisorias y de las vaguadas mejora muy considerablemente la calidad de la interpolación de altitudes entre curvas de nivel; además, produce un cuarteado de la superficie topográfica en secciones de forma aproximadamente plana, que facilita el análisis de los procesos hidrológicos.

La solución geométrica.—En 1975 Peucker y Douglas publicaron un trabajo de clasificación de elementos topográficos mediante procesado en paralelo de imágenes, MTDs en este caso. Previamente definieron siete categorías geomorfológicas: picos, depresiones, puertos, divisorias, cursos fluviales, laderas o llanos. Los autores asumían que cada elemento puede ser correctamente clasificado sin más consideración que la de sus inmediatos vecinos. Pero la clasificación local, en paralelo, no resultó satisfacto-

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

ria, aunque redujo la magnitud del problema. Así, la búsqueda de puntos singulares críticos resultaba claramente simplificada. De esta manera, el resultado de la clasificación paralela se retocaba con la llamada a rutinas de tratamiento digital de imágenes basadas en el concepto de ascensión de laderas o cumbres.

En 1984 Yoeli propuso una solución indirecta a la delineación automática de cuencas que coincide con la de Peucker y Douglas en varios aspectos. En efecto, Yoeli comienza con un tratamiento de ascensión de laderas de los elementos de un MTD, seguido de la conexión de las entidades lineales definidas en el primer paso: líneas divisorias y líneas de vaguada. Una operación local determina los máximos y mínimos. Estos puntos se convierten en lugares de arranque de las rutinas que definirán las líneas de corriente (ladera abajo, a partir del más elevado mínimo local) y las líneas divisorias (ladera arriba, a partir del máximo local de menor altitud).

Poco después, en 1985, Jenson presentó otra solución geométrica al problema. En este caso, los puntos críticos son los denominados celdas de drenaje, definidas por tener un perfil en forma de V en una ventana de nueve celdas centrada sobre el elemento en cuestión. En un segundo paso, estas celdas de drenaje son agrupadas en canales de drenaje (si dos celdas de drenaje son adyacentes y la inferior en altitud ha sido asignada ya a un canal, la otra también es asignada a ese mismo canal), y todas las demás celdas son etiquetadas con el identificador del canal al que contribuyen. Finalmente, se procede a fundir las microcuencas generadas en el paso anterior, siempre que estén suficientemente cerca y exista un camino de cotas moderadas entre ellas.

La comunicación de Frank y otros (1986), sobre definiciones formales de elementos geomorfológicos, también se fundamentó en criterios primordialmente geométricos. Aunque este trabajo tenía por objeto principal la exactitud de las definiciones, los autores tuvieron que optar por una serie de elementos del paisaje a representar formalmente. Frank y sus colaboradores acometen la definición de tres tipos de arcos y tres tipos de nodos, detectables automáticamente en una red topográfica triangular. Tales arcos y nodos (los arcos pueden ser fluentes, confluentes o difluentos; los nodos, depresiones, picos o laderas) se corresponden, en gran parte, con los lugares topográficamente significativos subrayados por los otros métodos: vaguadas, divisorias, máximos locales, mínimos locales y laderas.

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

Ejes y nodos han de ser conectados para configurar la red de divisorias y vaguadas de la superficie analizada.

Weibel y DeLotto (1988) publicaron una excelente recensión de métodos de clasificación automática de la topografía (la delineación de cuencas es una entre las muchas clasificaciones posibles), cuya secuencia genérica consiste en la sucesión de tres momentos: selección de variables (las más frecuentes son la altitud y sus derivadas), extracción de rasgos geométricos y clasificación propiamente dicha. Basándose en las técnicas utilizadas en los trabajos de compresión de imágenes, Weibel y DeLotto proponen la inclusión de clasificadores contextuales y jerárquicos. De esta manera se mejoran los resultados, al aplicar la clasificación contextual, y se alcanza una mayor flexibilidad a la hora de definir el tamaño de la ventana de extracción de rasgos geométricos.

La simulación de los procesos de drenaje.—En esta tercera clase de soluciones hay que situar la presentada por O'Callaghan y Mark en 1984. El contenido de su artículo es muy preciso y la descripción de los algoritmos utilizados casi exhaustiva. A partir de un MTD, automáticamente se termina delineando la red fluvial, mejor dicho, la red fluvial más probable. Como subproducto de esta tarea, se verifica una auténtica partición del área de estudio en cuencas y subcuencas. Este procedimiento, aunque diferente de los que hemos presentado hasta ahora, contempla los mismos principios físicos en que se basan los anteriores, esto es, los del campo gravitatorio terrestre. Como detalle, diremos que nuestra solución a la delineación de subcuencas (no a la de las cuencas) se basa en la simulación de los procesos de drenaje.

Dos años después, Band (1986) presentó un método de segmentación de cuencas y subcuencas, que situamos entre los métodos de simulación del drenaje porque lo consideramos más próximo al trabajo de O'Callaghan y Mark que a cualquier otro. Más concretamente, Band estaba interesado, como O'Callaghan y Mark, en deducir la red fluvial a partir de la información topográfica (MTD). El método de Band tiene tres fases principales. En la primera se calcula el gradiente de la superficie topográfica en todos los nodos del MTD en uso. A partir de la matriz de gradientes y de la localización de los sumideros de la red fluvial (*vid. supra*: la solución pragmática), se construye la red fluvial (sin necesidad de digitizarla; *vid. supra*: O'Callaghan y Mark). La segunda fase consiste en la extracción de las líneas divisorias, que se lleva a cabo mediante identificación de las

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

celdas más separadas localmente de celdas de la red fluvial. La última fase consiste en la codificación y etiquetado de todas las subcuencas. A partir de los sumideros de la red fluvial se recorre toda esta red en sentido de las agujas del reloj, girando siempre hacia la izquierda en todas las confluencias. Cada arco de la red fluvial es etiquetado con el número de orden en que es considerado. Posteriormente se etiqueta a todas las celdas que no pertenecen a canales de drenaje o a divisorias, propagando las etiquetas de los canales hasta toparse con las divisorias.

Martz and DeJong (1988) aplicaron el método de O'Callaghan y Mark a la medición de cuencas y subcuencas a partir de los MTDs de las comarcas agrarias de la pradera canadiense. En un paisaje como éste, poco articulado, resultado de la erosión glaciaria, la red fluvial está muy poco desarrollada y resulta muy difícil delinear las distintas cuencas y subcuencas. Consecuentemente, estos autores redactaron un programa (CATCH) para llevar a cabo la tarea de definir las cuencas y subcuencas en un terreno en el que la existencia de pequeñas depresiones es una realidad. Por este motivo, el programa CATCH registra una participación del territorio que los autores llaman matriz de cuencas locales, antes de proceder al rellenado de todas las depresiones locales y así calcular la partición global del terreno en cuencas hidrográficas.

El método publicado por Bennet y Armstrong (1989) es a la vez geométrico y basado en la simulación de los procesos de drenaje. En primer término se clasifican las celdas del MTD en seis categorías: celda de drenaje, celda de divisoria, collado, depresión, celda de cambio de pendiente, celda de llanura. Esta primera clasificación se lleva a cabo en términos puramente geométricos, examinando los cuatro perfiles centrados en la celda en cuestión en una ventana de 3 por 3 celdas (cf. Jenson, 1985). Pero en la misma pasada se registran también relaciones topológicas. Esto último se lleva a cabo enlazando las celdas adyacentes con similar función hidrológica, creando así grafos no direccionales. Enlaces topológicos válidos son: celdas de drenaje con celdas de drenaje, collados, depresiones o llanuras; celdas de divisoria con celdas de divisoria o collados; celdas de cambio de pendiente con celdas de cambio de pendiente. En una segunda fase se verifica una transformación de estos grafos no direccionales. En la red de drenaje, por cada nodo, sólo se permitirá un enlace aguas abajo, aquel que tenga una mayor pendiente (cf. O'Callaghan y Mark, 1984). Como resultado de la transformación se obtiene una colección de árboles

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

con la desembocadura en la raíz y las fuentes en las hojas. Para completar la representación de las cuencas son necesarios tres pasos adicionales: las divisorias deben cruzar los collados, será necesario fundir varias divisorias en una sola y habrá que descartar las depresiones espúreas. Los nodos y las cadenas desarrolladas durante la generación de la topología de la cuenca pasan a formar parte de una estructura TIN (*Triangulated Irregular Network*).

Extracción de cuencas hidrológicas a partir de modelos topográficos digitales

Presentamos ahora nuestra solución al problema. En la figura 1a aparece representado un MTD. En una malla de estas características, para delimitar una cuenca, se requiere que el sumidero de la corriente correspondiente sea asignado a una de las celdas de la malla, la celda «0» de la figura 1b.²

A continuación se define una estrategia para decidir qué píxeles se encuentran aguas arriba del sumidero de la cuenca. En la práctica se considera aguas arriba a todo píxel conectado al sumidero por una cadena de celdas que un flujo de agua seguiría. Normalmente esa secuencia es la marcada por las pendientes más pronunciadas, o por las direcciones de las proyecciones sobre la horizontal del vector perpendicular a la superficie en cada celda. En la figura 2 se puede examinar cuál es el objetivo de la delineación digital. Cada píxel aguas arriba es etiquetado con un «1», mientras que al resto de las celdas se les asigna un «0». Nuestro método define la cuenca de cualquier punto del cauce si sólo se dispone de la siguiente información: 1) La red fluvial digitizada. 2) Una matriz que cubra la zona, en la que se haya asignado el valor de sus cotas a los píxeles correspondientes al trazado de las curvas de nivel.

La generación de un MTD a partir de la información descrita en el párrafo anterior lleva consigo dos pasos: 1) la generación de los perfiles topográficos a lo largo de la red hidrográfica; 2) la interpolación del resto de las altitudes a partir de los píxeles pertenecientes a curvas de nivel,

² Agradecemos a Jesús Monge la delineación de todas las figuras que aparecen en este artículo.

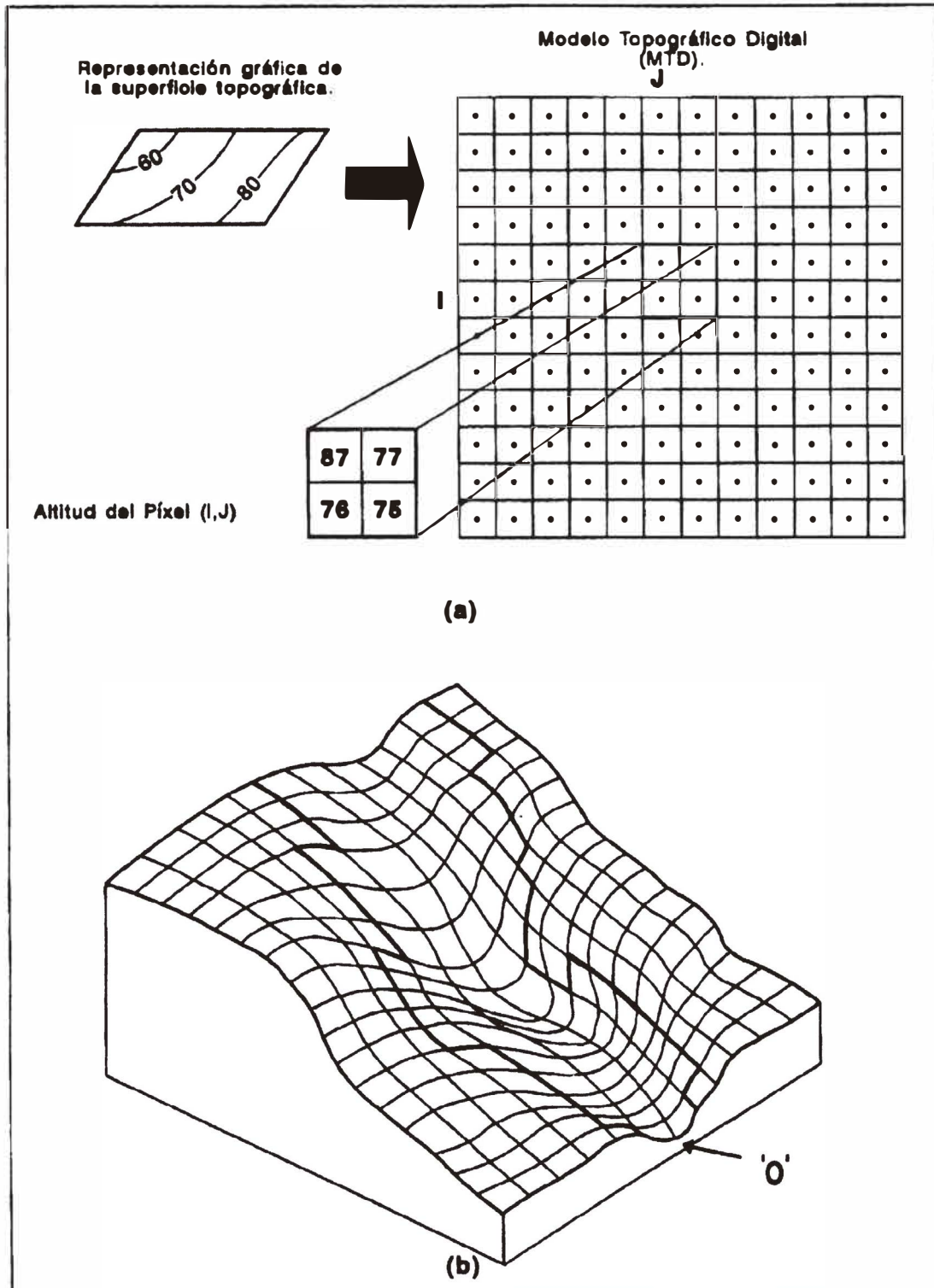


FIGURA 1.—Un MTD: a) Representación raster; b) Bloque diagrama

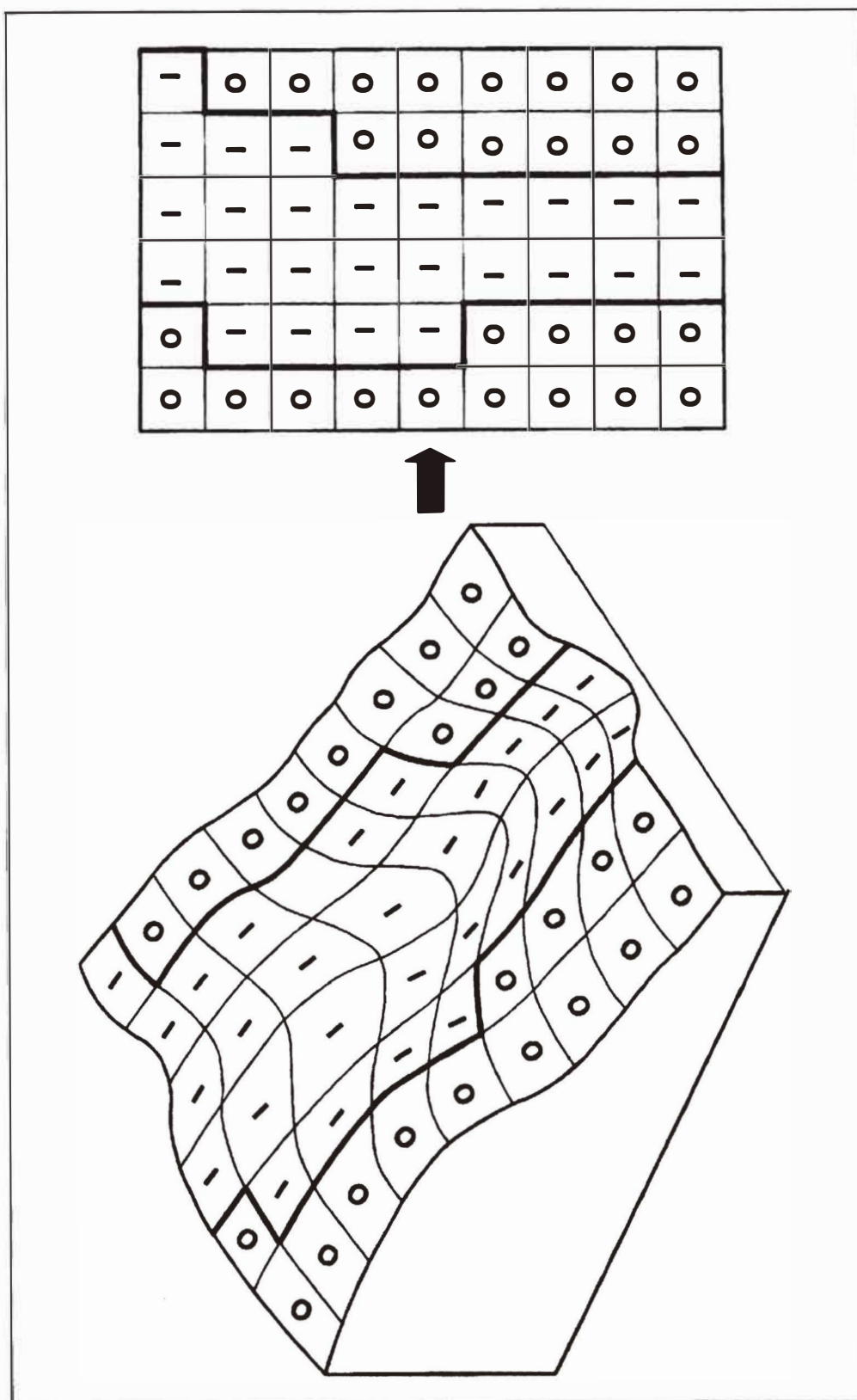


FIGURA 2.—Esquema ilustrativo del proceso de delimitación de cuencas hidrográficas

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

usando como elementos de control los perfiles generados en el paso anterior. En la figura 3 aparece un diagrama de los distintos pasos que es necesario dar.

El procedimiento que genera los perfiles topográficos de la hidrografía requiere que el usuario introduzca la altitud y la localización de los píxeles correspondientes a: 1) fuentes; 2) sumideros (en los bordes de la imagen); 3) puntos de confluencia. La figura 4 es un esquema de la construcción de los perfiles. Los planos D y E representan la hidrografía y la topografía en el dominio espacial. Cada serie de píxeles entre fuentes, confluencias o sumideros es un segmento o tramo. El resultado de este procedimiento es una imagen digital en la que los píxeles correspondientes a la red hidrográfica aparecen etiquetados con su altitud. El resto de los píxeles tiene valor «0».

A continuación se superponen la imagen de los perfiles topográficos de los elementos hidrográficos y la de curvas de nivel, y se invoca a un procedimiento de interpolación para que actúe sobre ellas. El algoritmo que hemos desarrollado se basa en el principio de interpolación en la dirección de la pendiente más pronunciada. El resultado de la interpolación es un MTD preparado para ser utilizado por las rutinas de segmentación hidrográfica.

La delimitación digital de cuencas y subcuencas.—La segmentación del terreno en unidades hidrográficas se puede llevar a cabo con diversa precisión, en función de sus objetivos. Por ejemplo, desde una perspectiva global, podemos estar interesados en la extracción de la cuenca de un río que cubre una parte sustancial de un continente. La mayoría de los escenarios prácticos, no obstante, se limitan a unidades espaciales de reducida magnitud, de carácter regional o local. La división de un área en cuencas hidrológicas de una cierta magnitud, poco detallada por tanto, se puede denominar delineación de nivel 1. Si se pretende un mayor detalle una cuenca puede dividirse en unidades de menor extensión, cuya escorrentía se dirija hacia tramos o secciones fluviales de especial interés. Este proceso de subdivisión puede denominarse delineación de nivel n , siendo n el número de subcuencas definidas en la cuenca de interés global.

Habitualmente, en un mapa topográfico pueden distinguirse varias redes de drenaje separadas por una red de divisorias. Consecuentemente, los dos objetivos principales de diseño de un sistema que proporcione la

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

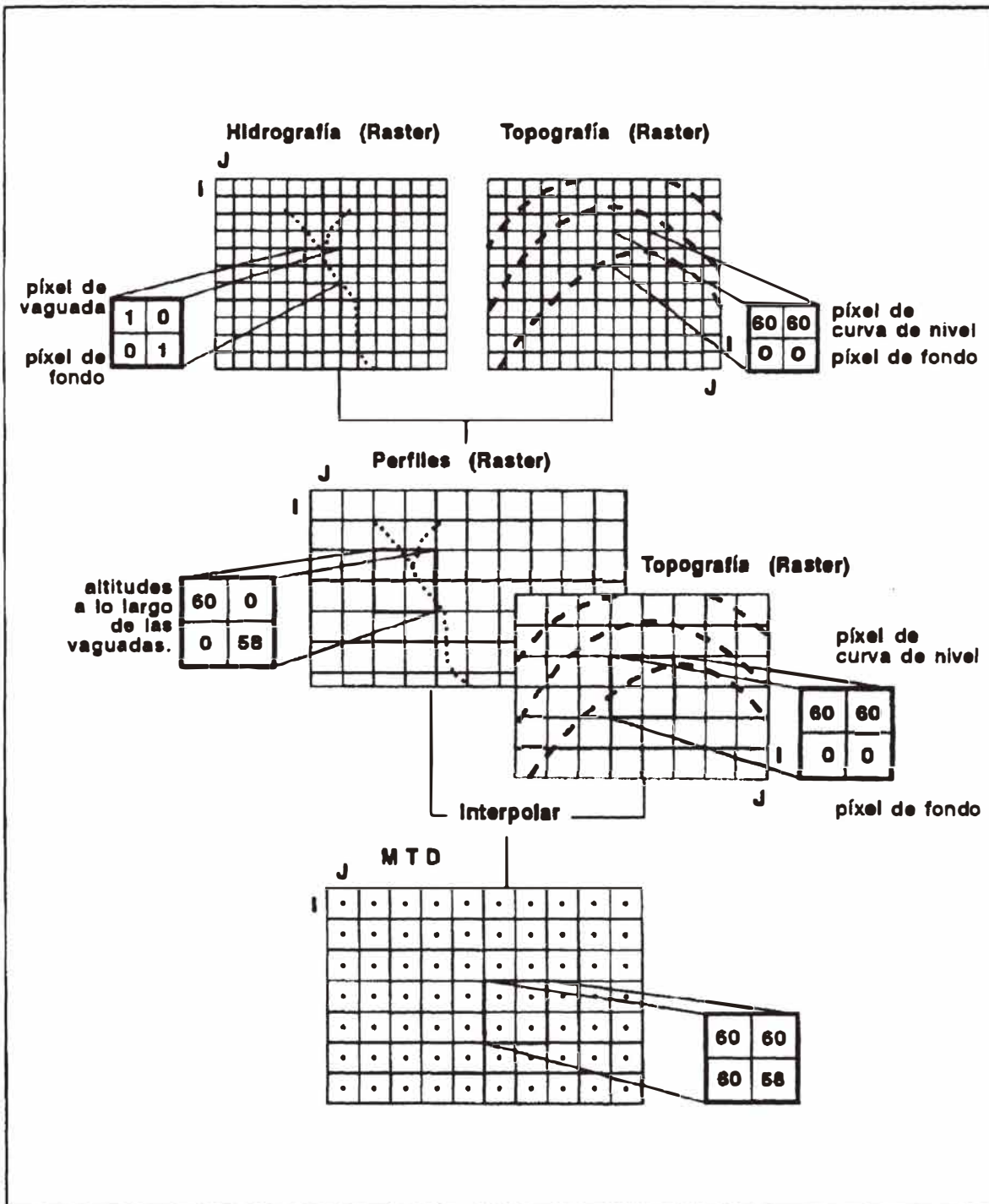


FIGURA 3.—Diagrama de creación de un MTD, a partir de información hidrográfica y topográfica

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

delineación automática de cuencas y subcuencas son: 1) el descarte inmediato de las cuencas que no son de interés para la realización de un determinado estudio o trabajo; 2) la definición de subcuencas con una gran flexibilidad. En nuestro sistema dos módulos especializados desarrollan por separado cada una de estas tareas (aunque nunca se acomete la realización de la segunda tarea sin restringir previamente el área problema: primera tarea). La definición de subcuencas requiere que el usuario defina, interactivamente o mediante fichero, las coordenadas de los puntos de las secciones fluviales en las que está interesado. El sistema responde con la definición de las subcuencas correspondientes, previa evaluación de los flujos de escorrentía de cada una de las celdas del MTD.

Para definir todas las cuencas de una área de estudio hemos redactado un procedimiento basado en la simulación de inundaciones. A partir del sumidero de la red hidrográfica el algoritmo considera recursivamente las celdas contiguas a la celda activa y las incluye en la cuenca en cuestión, si tienen mayor altitud y no han sido incluidas ya en otra cuenca. Si en la zona de estudio aparecen otras cuencas, la misma secuencia se repetirá tantas veces como cuencas y, en teoría, ninguna celda será etiquetada más de una vez. Muchos de los algoritmos que hemos presentado previamente en estas páginas se basan en este tipo de simulación: algunos se fijan en la orientación de la superficie topográfica, otros en los valores de las pendientes, otros, como el nuestro, solamente en las altitudes medias de las celdas. No se ha publicado nunca hasta ahora que estos algoritmos puedan cometer errores de asignación de celdas a cuencas, si las divisorias no están representadas. En nuestro caso, tenemos que comentar que el algoritmo secuencial generaba errores en numerosas ocasiones, pues los flujos de inundación cruzaban fácilmente las líneas divisorias no representadas. Nuestra solución, original a nuestro parecer, es la de recurrir a un tratamiento en paralelo de las diversas cuencas que compiten entre sí por la inundación de sucesivas celdas del terreno. La solución secuencial puede ser imaginada como la inundación sucesiva de cada una de las cuencas; nuestra solución, en cambio, es una inundación global. Una vez definidas las cuencas, y representadas por una matriz de etiquetas, ésta resulta un filtro de gran utilidad para extraer información correspondiente a unidades hidrográficas.

Para definir subcuencas nuestro sistema precisa la siguiente información: 1) el MTD; 2) los perfiles hidrográficos (un fichero raster en el que las

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

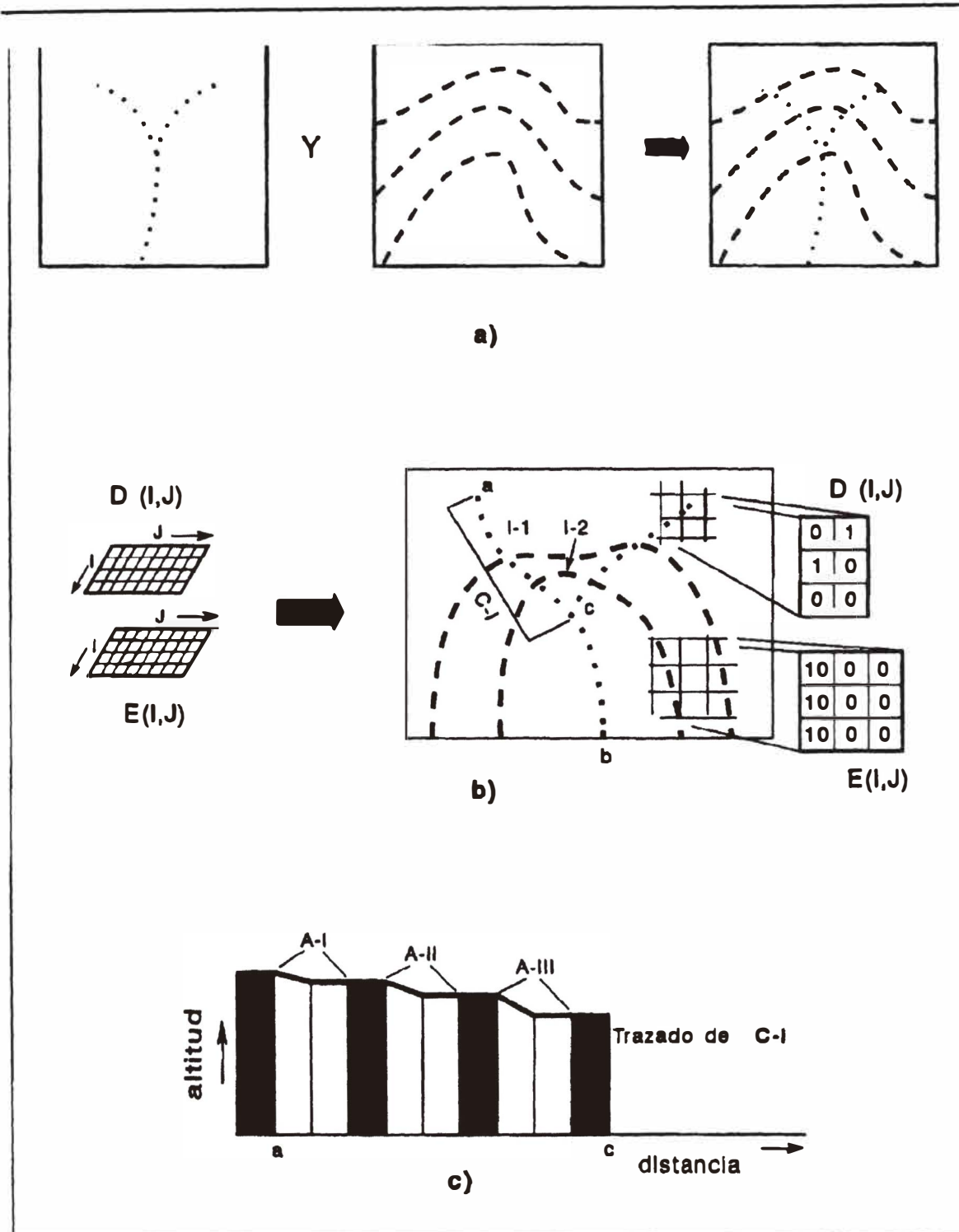


FIGURA 4.—Superposición de hidrografía y topografía: a) Esquema b) Vista en dos dimensiones c) Perfil longitudinal

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

celdas con valor distinto de cero son celdas pertenecientes a la red fluvial, siendo el valor de la celda su altitud); 3) un fichero raster binario que defina el espacio ocupado por la cuenca. El procedimiento interroga al usuario sobre las coordenadas de los puntos que van a definir la partición de la cuenca. Como los hidrólogos tienden a segmentar las corrientes en puntos de cambio brusco de pendiente, el sistema dispone de una rutina que calcula automáticamente esos puntos, sugiriéndoselos al usuario como umbrales de la partición. Si nuestra solución al problema de la definición de cuencas era la simulación de una inundación, para delimitar las subcuencas recurrimos a la simulación de la escorrentía. La figura 5 ilustra esquemáticamente nuestra solución. La figura 5a representa una cuenca simple con un único segmento fluvial. El usuario introduce los puntos 1, 2 y 3 como sumideros de las subcuencas en cuestión. En la figura 5b todas las celdas correspondientes a la red fluvial aguas arriba de los umbrales de segmentación son etiquetadas coherentemente.

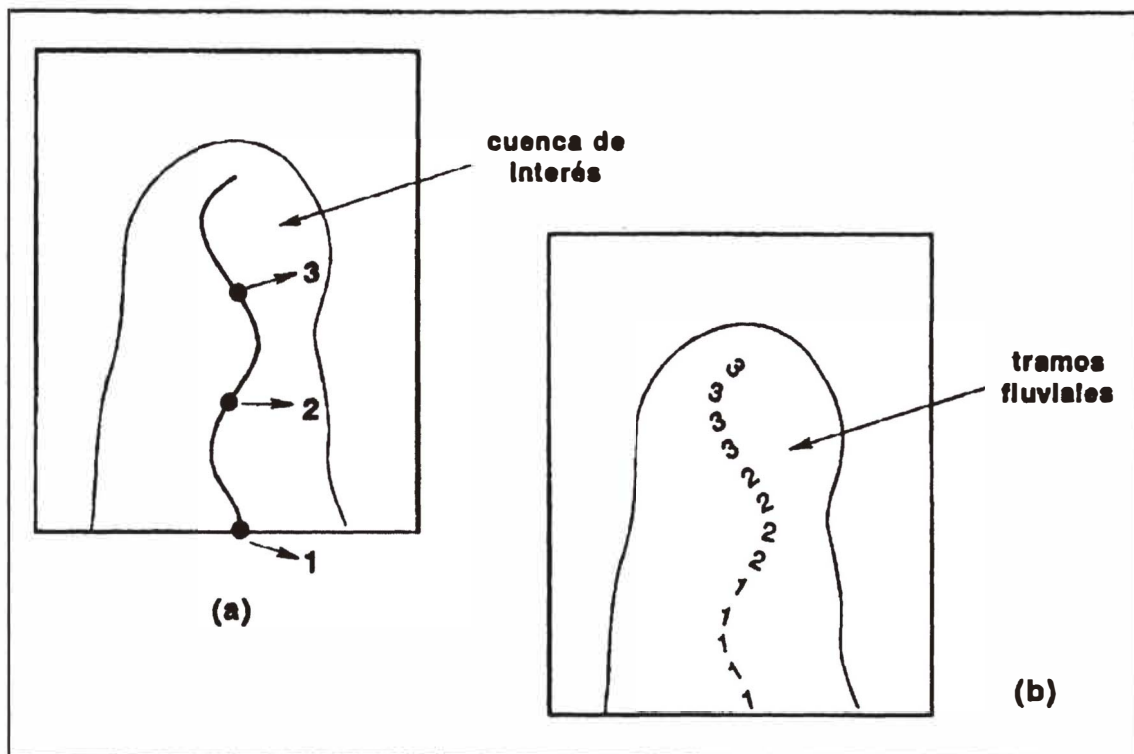


FIGURA 5.—Puntos de interés a lo largo de un eje fluvial (a) y su representación raster (b)

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

La figura 6 representa una ventana en la matriz que definirá exhaustivamente las subcuencas, en la que se reflejan los flujos de escorrentía a partir de las celdas «a», «b» y «c». Las celdas correspondientes a un eje fluvial, con la anchura de una celda, de orientación norte-sur, aparecen etiquetadas con los valores «1» y «2», correspondiente a dos tramos definidos por el usuario. El flujo correspondiente a la celda «a» termina en el segmento fluvial «2», el flujo originado en «b» termina en el segmento «1» y el correspondiente a «c» se encuentra una celda previamente etiquetada con el valor «1». El procedimiento asigna la etiqueta «2» a la celda «a» y la etiqueta «1» a las celdas «b» y «c». Se trabaja normalmente sobre una ventana de 3 por 3 celdas, pero se amplía su tamaño cuando es necesario para definir los flujos de escorrentía.

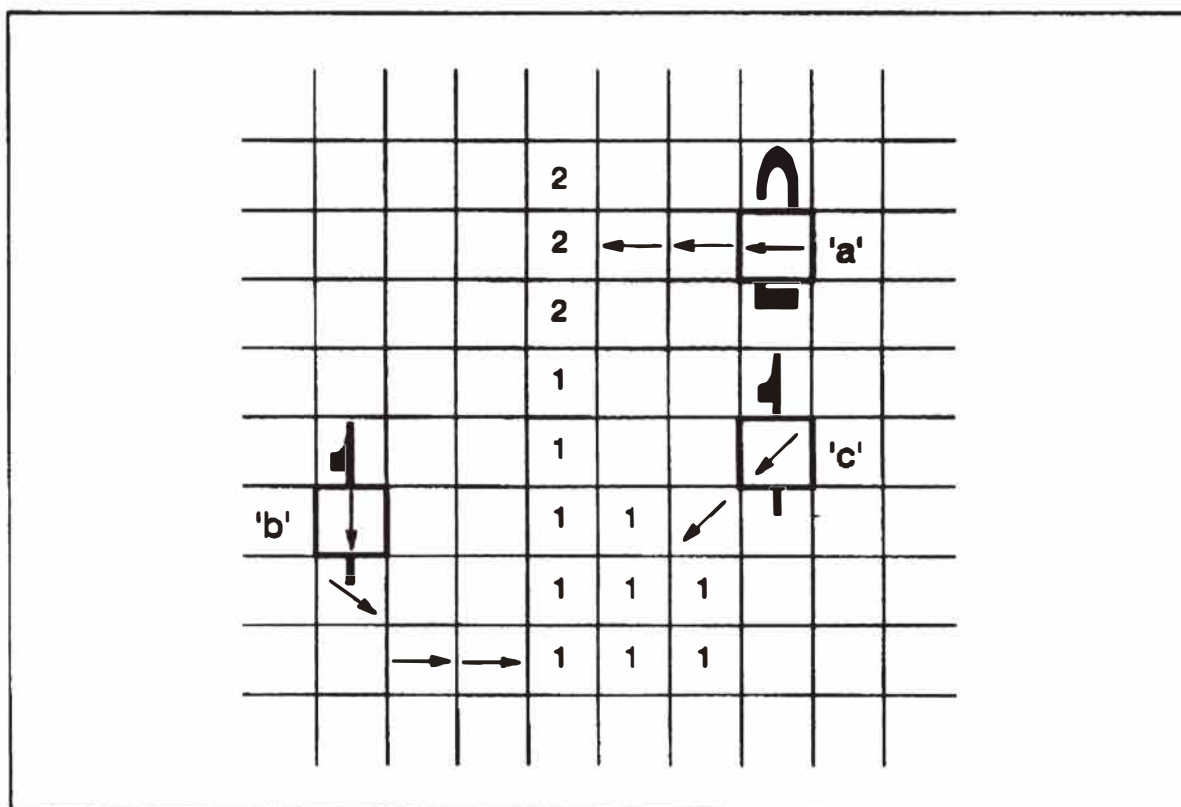


FIGURA 6.—Definición de subcuencas

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

Algunas aplicaciones hidrológicas

La descripción raster de la topografía, en combinación con la digitización de la red hidrográfica, con la segmentación del terreno en cuencas y subcuencas fluviales y con la distribución espacial de usos del suelo, permite automatizar el cálculo de importantes parámetros geométrico-fluviales y la elaboración de la curva de tiempos y áreas de cualquier elemento de la red.

A grandes rasgos, los pasos a seguir para construir una curva de tiempos y áreas son los siguientes: 1) Digitización de la topografía y de la red fluvial (*vid. supra*). 2) Segmentación del terreno en cuencas y subcuencas (*vid. supra*). 3) Cálculo de velocidades del agua en los lechos fluviales. 4) Estimación de la velocidad de los flujos no canalizados. 5) Determinación de isocronas.

La simulación, o cálculo, de velocidades de las aguas de superficie requiere el conocimiento del uso del suelo, de la topografía, de la localización de la red fluvial y de las divisorias de cuenca. Los usos del suelo pueden estimarse en la actualidad a partir de imágenes digitales captadas y transmitidas por satélites artificiales. El resto de la información requerida puede obtenerse digitizando mapas topográficos y transformando MTDs, como hemos demostrado ya en este artículo.

La velocidad media del agua en cada tramo fluvial es calculada a partir de la superficie que drena hacia ese tramo, su pendiente media y su rugosidad.

La estimación de la velocidad de los flujos no canalizados se lleva a cabo partiendo de los valores de la pendiente del terreno, y de dos parámetros más, que reflejan el uso del suelo dominante en cada elemento superficial.

Para la determinación de isocronas: 1) se calcula el tiempo empleado por un flujo no canalizado desde cada elemento superficial hasta el lecho fluvial correspondiente, $\{t_{ij}^{nc}\}$; 2) se determina el tiempo que tarda la corriente en atravesar el lecho fluvial desde cada una de sus celdas hasta la celda, «0», de base, $\{t_1^o\}$; 3) se suma a cada celda de la matriz $\{t_{ij}^{nc}\}$ el valor, t_1^o , del tiempo correspondiente a la celda del lecho en la que desemboca el flujo no canalizado que se origina en dicha celda; 4) se definen unos umbrales temporales discretos —cada 10 minutos, por ejemplo— y se

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

clasifican las celdas de $\{t_{ij}^{nc}\}$ en función de los mismos; $\{ent_{ij}^{nc}/10\}$ —las que tienen valores inferiores a 10 minutos, valores entre 10 y 20 minutos, entre 20 y 30, etc.

A partir de la matriz $\{ent_{ij}^{nc}/10\}$ se puede construir el histograma de tiempos y áreas, contabilizando las celdas de cada clase temporal. A partir de este histograma se dibuja la curva de tiempos y áreas, que representa la superficie total que en cada momento contribuye al caudal registrado en el punto de base del cauce. Esta curva tiene siempre aspecto sigmoidal. Los experimentos que hemos llevado a cabo nos permiten ser optimistas de cara a esta aplicación, ya que las curvas de tiempos y áreas que el procedimiento automático elabora en menos de 40 minutos no se diferencian sustancialmente de las delineadas manualmente por hidrólogos experimentados, usando mapas topográficos, en 5 ó 6 horas. Además, el modelo que hemos descrito tiene otras aplicaciones interesantes, por ejemplo, el estudio de alteraciones de parámetros de cuenca y sus consecuencias.

BIBLIOGRAFÍA

- BAND, L. E. (1986): «Analysis and Representation of Drainage Basin Structure with Digital Elevation Data», *Proceedings of the 2nd International Symposium on Spatial Data Handling*, IGU Commission on Geographical Data Sensing and Processing, Seattle, Washington, July, pp. 437-450.
- BARRERA, R. e HINOJOSA, A. (1986): *Compression Methods for Terrain Relief*, Technical Paper, Department of Electrical Engineering, apdo. 14-740, México D. F., 17 pp.
- BENNET, D. A., y ARMSTRONG, M. P. (1989): «An Inductive Bit-Mapped Classification Scheme for Terrain Feature Extraction», *GIS/LIS '89 Proceedings*, pp. 59-68.
- BERAN, M. A. (1982): «Hydrology and Automatic Cartography», *Cartographica*, vol. 19, n. 2, pp. 56-61.
- BERNARD, M. (1937): «Giving Areal Significance to Hydrologic Research on Small Areas», *Report of the Upstream Engineering Conference*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, pp. 50-75.
- FELLOWS, J. D. (1983): *A Geographic Information System for Regional Hydrologic Modeling*, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park.
- FLEWELLING, D. M. (1984): *Computerized Delineation of Watersheds Using Digital Elevation Model Data*, Master Thesis, Oregon State University.
- FOWLER, R. J., y LITTLE, J. J. (1979): «Automated Extraction of Irregular Network Digital Terrain Models», *Computer Graphics*, vol. 13, n. 2, pp. 199-207.
- FRANK, A.; PALMER, B., y ROBINSON, V. B. (1986): *Formal Methods for Accurate Definitions of Some Fundamental Terms in Physical Geography*, Report n. 54, Department of Civil Engineering, University of Maine at Orono, 18 pp.

JUAN A. CEBRIÁN y JAYANTA K. SIRCAR

- HUTCHINSON, M. F. (1988): «Calculation of Hydrologically Sound DEMs», *Proceedings of the 3rd International Symposium on Spatial Data Handling*, IGU Commission on Geographical Data Sensing and Processing, Sydney, Australia, August, pp. 117-133.
- JENSON, S. K. (1985): «Automated Derivation of Hydrologic Basin Characteristics from Digital Elevation Model Data», *AutoCarto7 Proceedings: Digital Representations of Spatial Knowledge*, ASP-ACSM, Washington D. C., pp. 301-310.
- LEE, J. (1989): «A Drop Heuristic Conversion Method for Extracting Irregular Network for DEMs», *GIS/LIS '89 Proceedings*, pp. 30-39.
- LOWDERMILK, W. C. (1929): «Further Studies of Factors Affecting Surficial Runoff and Erosion», *Proceedings, International Congress of Forestry*, pp. 606-628.
- MARKS, D.; DOZIER, J., y FREW, J. (1984): «Automated Basin Delineation from Digital Elevation Data», *Geo-Processing*, 2, pp. 299-311.
- MARTZ, L. W., y DE JONG, E. (1988): «Catch: A Fortran Program for Measuring Catchment Area from Digital Elevation Models», *Computers and Geosciences*, vol. 14, n. 5, pp. 627-640.
- MILLER, S. W. (1985): «A Spatial Data Structure for Hydrologic Applications», *Geo-Processing*, 2, pp. 385-408.
- O'CALLAGHAN, J. F., y MARK, D. M. (1984): «The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data», *Computer Vision Graphics and Image Processing*, vol. 28, pp. 323-344.
- PEUCKER, T. K., y DOUBLAS, D. H. (1975): «Detection of Surface-specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data», *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 4, pp. 357-387.
- RAGAN, R. M., y JACKSON, T. J. (1975): «Use of Satellite Data in Urban Hydrologic Models», *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 101 (HY12), pp. 1.469-1.475.
- ROSS, B. B. y otros (1978): «A Model for Evaluating the Effect of Land Uses on Flood Flows», *Virginia Water Resources Research Center Bulletin*, 85.
- SALOMONSON, V. V. (1993): «Chapter 29: Water Resources Assessment» in COLWELL, R. N. ed., *Manual of Remote Sensing*, ASP, Falls Church, Virginia, pp. 1.497-1.570.
- SHEPARD, D. (1968): *Program WATERSHED*, Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard University.
- SIRCAR, J. K. (1986): *Computer Aided Watershed Segmentation for Spatially Distributed Hydrologic Modeling*, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Parke, 305 pp.
- SPRUNT, B. (1972): «Digital Simulation of Drainage Basin Development» in CHORLEY, R. J. ed., *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen & Co. Ltd., pp. 371-389.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1978): *HYDPAR: Hydrologic Parameters, Users Manual*, The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- WEIBEL, R., y DeLOTTO, J. S. (1988): «Automated Terrain Classification for GIS Modeling», *GIS/LIS '88 Proceedings*, vol. 2, pp. 618-627.
- YOELI, P. (1984): «Computer Assisted Determination of the Valley and Ridge Lines of Digital Terrain Models», *International Yearbook of Cartography*, Kirschbaum Verlag, vol. 24, pp. 197-206.

RESUMEN.—*Delineación automática de cuencas fluviales.* En este artículo se presenta un prototipo que permite la delineación automática de las parcelas del territorio que drenan hacia un determinado segmento fluvial.

Se parte de la información registrada en un mapa topográfico, que es videodigitizada y

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS FLUVIALES

procesada para determinar pendientes y orientaciones de las unidades del terreno (modelo topográfico), y para localizar espacialmente puntos de la red hidrográfica, enlazados entre sí (modelo de drenaje). El sistema interpreta la información que se le confía y lleva a cabo la delineación de cuencas y subcuencas fluviales hasta llegar al grado de precisión requerido por el usuario. Una vez segmentado el territorio, resulta sencillo determinar las características principales de una red de drenaje, así como sus respuestas ante hipotéticos acontecimientos.

PALABRAS CLAVE.—Modelos topográficos digitales. Modelos digitales del terreno. Modelos hidrológicos desagregados. Derivación automática de parámetros hidrológicos.

ABSTRACT.—*Computer Assisted Basin Delineation.* This paper describes some results of using video technology as a framework for spatially distributed hydrologic modeling. The designed prototype allows the delineation of upland watersheds of user specified channel reaches.

The system operates on widely available hard copy contour maps, that are video-digitized and further processed to derive terrain slopes and aspects (the elevation model), and the location of a sizeable number of linked channel elements (the drainage network model). Once the sub-watersheds corresponding to the reaches of the channels are delineated, any of several available techniques may be used to accomplish the overland flow routing.

KEY WORDS.—Digital Elevation Models. Spatially Distributed Hydrologic Modeling. Automated Terrain. Hydrology Classification.