

Creación de Modelos Topográficos Digitales (MTDs) a partir de curvas de nivel rasterizadas *

Jayanta K. SIRCAR y Juan A. CEBRIÁN

1. INTRODUCCIÓN

Un Modelo Topográfico Digital (MTD) es cualquier representación en soporte informático (digital) de una superficie topográfica —*Digital Elevation Models (DEM)*, en la literatura anglosajona—. Hasta mediados de los años setenta, no obstante, el término habitual era el Modelo Digital del Terreno (MDT) —*Digital Terrain Model (DTM)*, en los países de habla inglesa—. Recientemente, ese término se utiliza más bien para aludir a los Sistemas de Información Geográfica (SIG, o GIS en países angloparlantes), que incluyen, además de la topografía, otras propiedades del terreno: tipos de suelos, vegetación, hidrografía, red vial, etc. (Cebrián y Mark, 1986).

Los MTDs ofrecen una amplia gama de aplicaciones, tanto en escenarios civiles como militares. Estas aplicaciones incluyen las siguientes áreas:

a) Producción de mapas de base a partir de levantamientos topográficos, o mediante procedimientos fotogramétricos. Los MTDs son muy utilizados también en el sombreado automático de relieves, en la elaboración de bloques diagrama y en la de otras representaciones topográficas complicadas.

* El presente trabajo fue presentado en su versión original, «Dem Generation from Raster Digitized Contour Maps», a la 8.ª Asamblea General y 13.ª Conferencia Internacional de Cartografía de la ACI. Morelia (México), 11-22 de octubre de 1987.

b) Ciencias de la Tierra (Hidrología, Geomorfología, Geología). Los MTDs facilitan datos para los estudios de las formas de relieve, como, por ejemplo, en análisis de frecuencias de pendientes y en la definición automática de cuencas fluviales, y la extracción de características de la red de drenaje. Los MTDs han demostrado su utilidad en estudios de correlación entre tipos de roca y topografía y en trabajos de prospección geológica.

c) Ingeniería de montes. Algunas de las primeras aplicaciones no militares de los MTDs se dieron en los trabajos de ingeniería de montes. Los cálculos de áreas de visibilidad son de vital importancia para decidir dónde se han de colocar las torres de vigilancia forestal. Los efectos de las diversas técnicas de explotación en la erosión de suelos, en la contaminación de cursos de agua y en la repoblación forestal dependen en gran parte de la pendiente y el aspecto topográficos. Los MTDs pueden ser, por tanto, de gran utilidad a la hora de determinar el tipo más apropiado de explotación maderera.

d) Planificación urbana y regional. La planificación de la red de abastecimiento de agua y de la de conducción de aguas residuales de una ciudad, por ejemplo, depende a veces de la topografía. El uso de MTDs es cada vez mayor en trabajos de planificación de autopistas y en otros procedimientos de selección de vías de comunicación.

e) Ingeniería civil y de minas. Los MTDs resultan utilísimos en cálculos de capacidad de pantanos, de materiales necesarios para la construcción de presas, de movimientos de tierra para trazado de autopistas y de parámetros para una explotación minera. También pueden ser de gran utilidad en la búsqueda de yacimientos de minerales presentes en depósitos aluviales, restringiendo la zona de búsqueda necesaria para descubrir la roca de origen de tales derrubios.

f) Teledetección. La correcta interpretación de imágenes procedentes de scanners multiespectrales, tales como *Landsat* o *Thematic Mapper*, se ve claramente dificultada por las perturbaciones de la superficie topográfica (que provocan sombras y hacen que el ángulo de incidencia de los rayos solares no sea constante) en las áreas montañosas. Los MTDs pueden, por tanto, ser de gran utilidad en la simulación de los efectos de la topografía en las características de la luz incidente y reflejada; estas propiedades simuladas se usan para corregir la imagen.

g) Aplicaciones militares. La *Defense Mapping Agency* (DMA) de los Estados Unidos de América ha sido desde los comienzos la primera organización productora y consumidora de MTDs a escala mundial. Las aplicaciones de los MTDs en el terreno militar varían desde la elaboración de mapas topográficos hasta la creación de sistemas de navegación de misiles crucero, siendo especialmente importantes la determinación de rutas óptimas en distintos supuestos tácticos, los cálculos de zonas de visibilidad y los simuladores de vuelo y de escenarios bélicos.

La discusión sobre Modelos Topográficos Digitales, sus aplicaciones y producción tiene una relevancia particular dentro de la Geografía española, ya que desde hace un par de años se dispone de un modelo de la superficie topográfica de nuestro país. Este MTD recoge las altitudes registradas sobre una malla rectangular de puntos, separados entre sí por 50 m. en el plano horizontal en ambas direcciones N-S y E-O. Elaborado por la DMA estadounidense y donado al Instituto Geográfico Nacional, ha sido revisado y corregido ampliamente por esta última institución (que es la encargada de su gestión y mantenimiento). En los trabajos de depuración del modelo se ha contado también con el concurso de empresas cartográficas particulares.

2. LA PRODUCCIÓN DE MTDs

Aunque se pueden usar distintas estructuras de datos para describir numéricamente una superficie topográfica, la malla rectangular de altitudes es la estructura más genérica y operativa.

La producción de MTDs se puede dividir en dos grandes tareas: recopilación de datos y depuración de los mismos. La depuración de errores en MTDs, que era considerada como tarea de escasa importancia, está adquiriendo cada vez mayor relieve, a medida que la recopilación de datos se lleva a cabo de manera más y más automatizada. En este artículo nos hemos ceñido a los aspectos relacionados con la recopilación de datos. De todas formas, se mencionan brevemente en el texto algunas técnicas de edición, desarrolladas por instituciones cartográficas gubernamentales para detectar los errores producidos por procesos automáticos (no supervisados) de producción de MTDs.

Los MTDs son el resultado de procedimientos de interpolación a partir de las altitudes de una serie de puntos muestrales. Estas altitudes pueden haber sido medidas en un mapa, en un estereomodelo o directamente sobre el terreno. Torlegard (1981) ha inventariado recientemente los diferentes modos de muestreo de altitudes:

1. *Muestreo aleatorio (puntos).*
2. Registro de elementos especialmente característicos del terreno en cuestión (puntos y líneas).
3. Perfiles.
4. Mallas rectangulares.
5. Curvas de nivel.

La obtención de datos mediante un muestreo aleatorio del terreno, aunque posible, no parece ser un método apropiado para describir la topografía.

La toma de muestras a lo largo de los elementos más característicos del terreno (puntos: cimas, depresiones locales, collados, etc.; líneas: cursos de agua, divisorias de aguas, etc.) es una tarea costosa, máxime cuando no se

puede automatizar. Sin embargo, el esfuerzo que conlleva merece la pena, ya que esos datos, una vez recopilados, pueden introducirse en posteriores procesos de interpolación como puntos críticos. No parece que este método sea el adecuado para la producción masiva de MTDs, aunque puede ser utilizado para mejorar la calidad de MTDs producidos según alguno de los otros métodos de muestreo.

Los métodos de muestreo en mallas rectangulares homogéneas o a lo largo de perfiles no tienen en cuenta las características propias de la topografía que sondean. Por tanto, la información referente a la configuración y altitud del terreno entre dos puntos o líneas registradas sólo puede, en todo caso, «adivinarse».

El procedimiento de muestreo a lo largo de curvas de nivel incorpora características muy deseables (Clarke *et al.*, 1982). El método es selectivo en el sentido de que cumbres, líneas de ruptura de pendiente, divisorias, cauces y otras características importantes del terreno son implícita o explícitamente registradas durante el trazado de las curvas de nivel. El muestreo mediante curvas de nivel se puede considerar también como homogéneo, ya que se toman en consideración todas las partes del estereomodelo, y además como progresivo, porque la densidad de datos va en aumento a medida que el terreno se hace más articulado. La estructura de las curvas de nivel depende de la geomorfología local, mientras que el intervalo entre ellas pone un claro límite a las elevaciones que pudieran quedar no registradas.

El *United States Geological Survey* (USGS) está embarcado en un proceso de producción de MTDs de gran calidad, partiendo de curvas de nivel digitizadas. Mientras tanto, el USGS ofrece otros MTDs de menor calidad, que genera con gran rapidez, utilizando métodos menos precisos (Allder *et al.*, 1982).

3. DIGITIZACIÓN DE CURVAS DE NIVEL

Existen en la actualidad cuatro formas genéricas de digitizar curvas de nivel (Doyle, 1978), pero sólo tres de ellas son de hecho operativas. Hacerlo manualmente, siguiendo la curva en un digitizador de mesa es un trabajo minucioso y aburrido, que puede inducir a innumerables errores, duplicando u omitiendo parte de la información presente en el mapa. Este método ha sido descartado de entrada.

La aparición de digitizadores capaces de seguir líneas fue un acontecimiento de gran importancia de cara a la solución automática del problema. El operador etiqueta cada curva con la correspondiente altitud y sitúa el cursor gráfico sobre cualquier punto de ésta. El operador sólo debe decidir el camino a seguir cuando el cursor «se pierde».

Una tercera alternativa es registrar digitalmente los movimientos de la

marca de referencia calibrada de un estereoploter durante el trazado de cada curva de nivel.

Una última posibilidad es utilizar un scanner de tambor o de mesa para obtener una descripción raster de la placa del mapa de base que recoge la descripción topográfica. El método que presentamos en este artículo asume este procedimiento de digitización. Nuestro trabajo converge con el de Roubal y Poiker (1985) y Mark (1986), habiendo sido presentado ya un avance del mismo en un congreso anterior (Sircar y Cebrián, 1986). Nos hemos centrado principalmente en la digitización de las curvas de nivel, empleando técnicas raster, y en su etiquetado (por altitud) semiautomático, definiendo la mínima información necesaria para llevarlo a cabo.

3.1. *La imagen raster de un mapa de curvas de nivel*

Supongamos que se dispone de una descripción raster de un mapa de curvas de nivel. Los más potentes scanners del momento son capaces de examinar el documento de entrada, mediante un sistema óptico o láser, a razón de 200, o incluso más, líneas por pulgada. Con tales resoluciones, una hoja del mapa topográfico de escala 1/24.000 del USGS requeriría 16 Megabytes de memoria para ser almacenada. Al no disponer del hardware capaz de tratar ese ingente volumen de información, hemos tenido que simular las características digitales de los mapas rasterizados que pudieran resultar de tan sofisticadas máquinas. Para lo cual hemos convertido pequeños fragmentos de mapas topográficos de las características que acabamos de señalar en imágenes raster de 512×512 píxeles (aproximadamente, 0,26 Megabytes), utilizando una cámara de televisión con salida digital. Antes de «filmar» las diferentes escenas se suprimieron todos los rótulos y se conectaron todos los rasgos lineales que aparecían fragmentados en el dibujo original. Este trabajo de retoque del mapa es necesario, ya que si no se lleva a cabo, el procedimiento de etiquetado generará soluciones erróneas. En este trabajo hemos utilizado una cámara de televisión monocroma Cohu de la serie 2810B. La salida del circuito cerrado, una vez discretizada, se convierte en una imagen de 512×512 píxeles, de 8 bits de resolución. La digitización de la imagen se lleva a cabo en tiempo real: 1/30 de segundo. La calidad de la lente y el tamaño del documento a digitizar condicionan la escala de la imagen resultante.

A los píxeles correspondientes a puntos en curvas de nivel (negros en el mapa digitizado) se les asigna el valor cero, de una escala de 256 valores de tonos grises posibles (0-255). Los restantes píxeles, correspondientes a zonas blancas en el mapa, reciben valores distintos de cero. Lo ideal sería que la imagen inmediatamente resultante de la digitización estuviera compuesta de valores cero en las posiciones correspondientes a puntos de curvas de nivel, y de valores 255 en el resto. En la práctica nunca sucede así, debido a

las condiciones de iluminación y a la relativa precisión de la cámara. Es necesario, por tanto, «limpiar» la imagen del mayor número de interferencias posible, si se pretende continuar adelante en el proceso de digitización del mapa.

El objetivo de esta transformación de la imagen es el filtrado de la información presente, de manera que los valores resultantes de los píxeles sean 0 ó 1 (es decir, una imagen binaria). Sobre la imagen binaria será más fácil reconocer automáticamente los componentes esenciales de la misma, su extracción y su correcto etiquetado.

El filtrado de la imagen consta de tres fases. La primera de ellas consiste en realzar el contraste de la imagen. El segundo paso es una transformación que realza los bordes (zonas de contacto entre regiones de distinto color). El tercero es una clasificación, mediante umbrales, de la imagen.

Un método muy frecuente para extraer objetos de una imagen es la definición de umbrales. Si la imagen dada «P» consta de píxeles cuyos valores pertenecen todos al intervalo $[z_1, z_2]$ y «t» es un número cualquiera comprendido entre z_1 y z_2 , el resultado del establecimiento del umbral «t» en «P» será una nueva imagen «Pt», que consta de dos únicos valores, definida por:

$$P_t(x, y) = \begin{cases} a, & \text{si } P(x, y) \geq t \\ b, & \text{si } P(x, y) < t. \end{cases} \quad (\text{I})$$

En nuestro caso, el resultado es una imagen binaria, con «unos» en los píxeles correspondientes a curvas de nivel y con «ceros» en el resto del mapa.

La imagen binaria de un mapa de curvas de nivel es una partición del plano, en la que se pueden distinguir dos tipos de regiones: las regiones correspondientes a curvas de nivel, por un lado, y las regiones comprendidas entre ellas.

Al procedimiento que coloca las mismas etiquetas en los píxeles que pertenecen a la misma región de una imagen, se le conoce con el nombre de reconocimiento de componentes conexas. Para que el ordenador pueda reconocer las regiones de la imagen binaria del mapa de isolíneas es necesario este etiquetado.

Roubal y Poiker (1985) han propuesto la idea de etiquetar únicamente las curvas de nivel, dejando el resto del mapa (las regiones comprendidas entre las curvas) sin reconocer.

En una presentación anterior (Sircar y Cebrián, 1986) etiquetábamos únicamente las regiones comprendidas entre las curvas de nivel. El resultado de este procedimiento es un «negativo» del mapa de regiones obtenido por el método anterior.

Mark (1986) ha sugerido la idea de etiquetar toda la imagen. Las etiquetas negativas diferenciarían las regiones de las curvas de nivel de las regiones comprendidas entre ellas.

4. EL ETIQUETADO DE LAS CURVAS DE NIVEL

4.1. *El grafo del mapa de curvas de nivel*

Atendiendo a todo lo publicado sobre el tema, Boyell y Ruston (1963) fueron los primeros en aplicar algunos conceptos de la teoría de grafos a la manipulación computadorizada de curvas de nivel digitizadas. Boyell y Ruston se enfrentaban al problema de recuperar cuasi instantáneamente las altitudes correspondientes a puntos significados y mutuamente correlacionados de una superficie topográfica en la generación de perfiles para la simulación del funcionamiento de un radar a bordo de un aeroplano. Definiendo una función que representa curvas de nivel mediante ejes y zonas entre isolíneas mediante nodos de un grafo, un mapa de curvas de nivel se transforma en un árbol. Esta estructura manifiesta el hecho de que las áreas definidas por las isolíneas de un mapa de esta índole se ordenan parcialmente por inclusión. Una vez identificada la primera de las curvas de nivel que una trayectoria atraviesa, el árbol se convierte en el medio más eficaz para localizar las inmediatas curvas que serán atravesadas a continuación. La primera aplicación, por tanto, del concepto de árbol de isolíneas fue la construcción de un índice para optimizar la recuperación de elementos espaciales (nótese que la información referente a relaciones de proximidad siempre acelera los procesos de recuperación de individuos espacialmente referenciados y que el árbol de isolíneas no es sólo la representación de un orden parcial por inclusión, sino también un instrumento de información local).

Muchos otros autores, desde entonces, han abundado en las aplicaciones del concepto de árbol de isolíneas (Freeman y Morse, 1967; Morse, 1968 y 1969; Merrill, 1973, y Mark, 1978). Roubal y Poiker (1985) han sido los primeros en apuntar la aplicabilidad de esta estructura de datos a la automatización del etiquetado de curvas de nivel digitizadas.

4.2. *Etiquetado del árbol de isolíneas en ausencia de interrupciones en el dibujo de las curvas y de pendientes bruscas*

Dos regiones separadas por la misma curva de nivel tienen, obviamente, altitud media distinta. En el conjunto de las regiones entre isolíneas esa relación binaria ($= \langle$) es una relación de orden parcial (el lector puede comprobar por sí mismo que la relación es reflexiva, antisimétrica y transitiva). El conjunto de las regiones comprendidas entre curvas de nivel es, por tanto, un conjunto ordenado parcialmente o poset. Cada poset tiene dos subconjuntos de especial interés: el de maximales y el de minimales. Un maximal es un elemento que no tiene otro estrictamente «mayor» que él mismo; una minimal es un elemento que no tiene otro estrictamente «menor» que él mismo en el conjunto. La figura 1 es una representación de un poset, en el que el

elemento $i = \langle$ elemento j si y sólo si elemento $i \leftarrow$ elemento j . En la figura, a, h, e y i son los maximales, y d y f , los minimales.

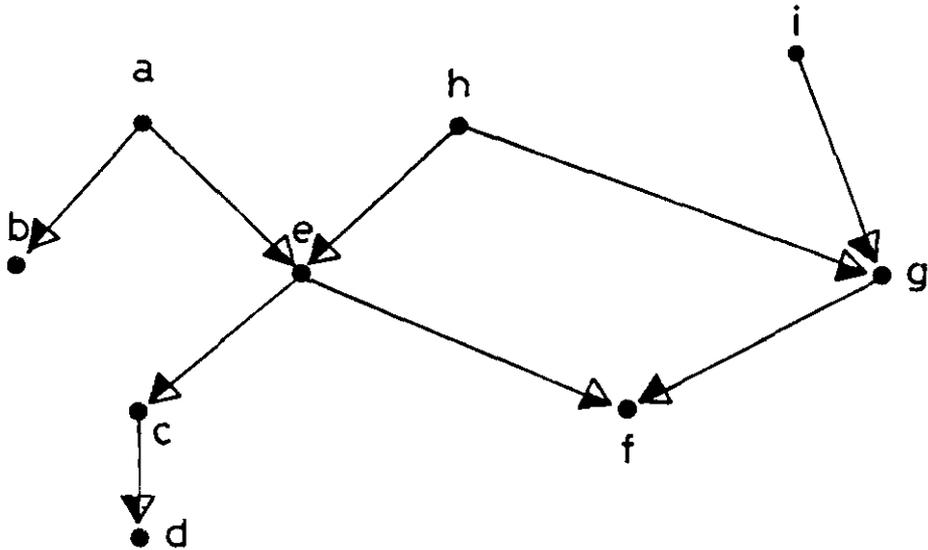


Figura 1.—Diagrama de un orden parcial.

Si consideramos el caso de los mapas de curvas de nivel en los que las líneas no se confunden (fig. 2) comprobamos que el poset de las regiones comprendidas entre las curvas tienen una estructura simple. Esto se debe al hecho de que si una región es inmediatamente menor que dos o más regiones, éstas no tienen límite superior en el poset (límite superior de dos o más elementos de un poset es cualquier elemento que es mayor que todos ellos).

Cualquier poset puede ser representado por un grafo orientado. Así, el problema de etiquetar las curvas de nivel se convierte en la etiquetación de los ejes del grafo.

Observemos ahora hasta qué punto podemos automatizar la definición del poset de regiones comprendidas entre curvas de nivel de un mapa topográfico. Primeramente, el reconocimiento de los ejes del poset, siendo el mapa una imagen raster, consiste en el registro de los pares de regiones adyacentes, de las regiones resultado del análisis previo de etiquetado de componentes conexas (fig. 3).

El grafo resultante no es, por supuesto, la representación del poset, pero si conseguimos indentificar el subconjunto de minimales o el de maximales (uno de ellos bastaría), el poset quedaría completamente definido. Por la propiedad transitiva, la orientación de los ejes se propaga en dirección as-

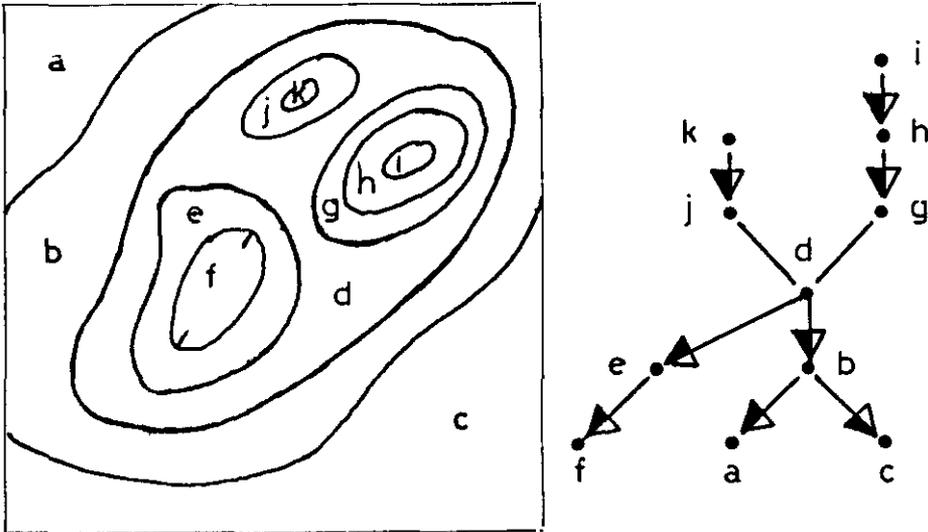


Figura 2.—Orden parcial en un mapa de isolíneas.

cedente (partiendo de los minimales) o descendente (partiendo de los maximales) por todo el grafo. Nosotros decidimos definir el poset mediante la identificación de minimales (mínimos locales topográficos del mapa en consideración). En el caso de un mapa de curvas de nivel en el que las curvas no se confunden y en el que no hay interrupciones en el dibujo de éstas, el grafo orientado que representa al poset es un árbol, o un conjunto de árboles.

El mismo recorrido del grafo que define el poset puede etiquetar todos los ejes en cuestión, si al mismo tiempo que identificamos los minimales del poset introducimos las altitudes correspondientes a las isolíneas que los deli-

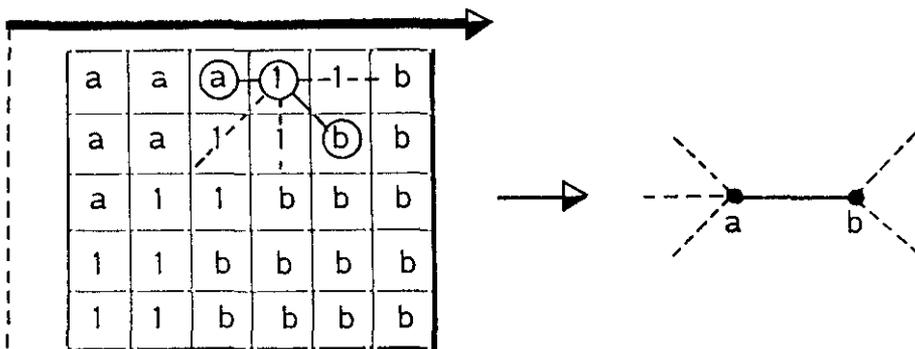


Figura 3.—Detección de regiones adyacentes.

mitan. Los ejes cuyo origen es uno de los minimales se etiquetan con las altitudes dadas. A medida que el recorrido del grafo tiene lugar, los ejes de salida de un nodo se etiquetan con la altitud de los ejes de entrada a ese nodo, más el intervalo entre curvas de nivel del mapa (fig. 4).

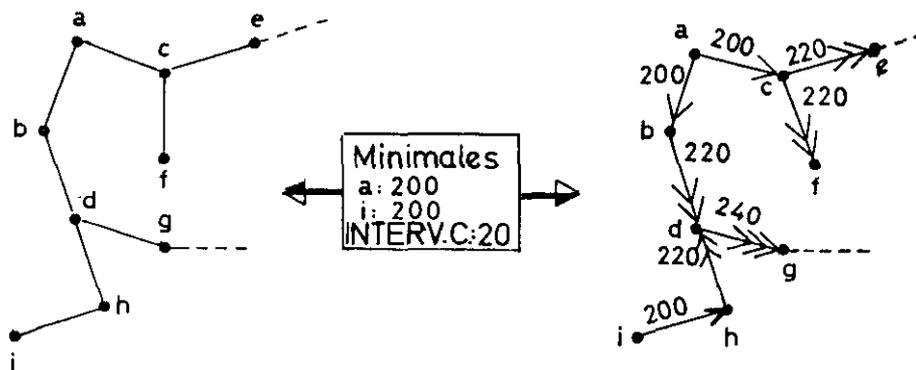


Figura 4.—Etiquetado de los ejes del grafo.

La estrategia de etiquetado de curvas de nivel que hemos presentado es superior a las habitualmente utilizadas en los centros de producción cartográficos. Esto demuestra, una vez más, que en el desarrollo de aplicaciones informáticas, la representación del problema es primordial para su correcta solución.

En nuestro caso, hemos convertido el problema de etiquetar curvas de nivel en el de recorrer adecuadamente un grafo orientado, que es una tarea relativamente sencilla para la que ya existen soluciones muy eficaces. Este es el método para afrontar problemas que son complejos en apariencia. Un problema complejo en sí mismo puede tratarse más eficazmente en otro marco, o espacio, en el cual se pueda comprender con mayor facilidad. Esto es lo que hemos hecho: una a manera de proyección que, reduciendo las dimensiones del espacio del problema, ha facilitado encontrar una solución mejor. La digitización y etiquetación masiva de curvas de nivel estaban esperando, eso creemos, un nuevo enfoque, como el que presentamos, que las hiciera posibles.

Formalmente hablando, marcando los mínimos locales topográficos en el grafo (raíces), lo hemos convertido en un conjunto (bosque) de árboles enraizados (Gold y Cormack, 1986), tantos como mínimos locales topográficos resaltan.

Nuestro procedimiento de etiquetado es un recorrido *breath-first* en paralelo de todos los árboles del bosque. Un recorrido *breath-first* visita todos los hijos de un nodo antes de visitar a cualquiera de los hijos de sus hijos. Dicho con otras palabras, el recorrido del árbol es tal, que todos los nodos

con la misma altitud se procesan en secuencia ininterrumpida. Esto implica que ninguna raíz de elevación mayor que la de otros mínimos topográficos se visita antes de que todos los nodos en el árbol con menos elevación hayan sido visitados.

Las acciones que se suceden al visitar un nodo en el grafo son: 1) evaluación de la altitud de sus hijos (sumando el intervalo entre curvas de nivel a su propia elevación), y 2) inclusión de todos éstos en la lista ordenada por altitudes, que controla el recorrido del grafo. Una vez definidos completamente los nodos del grafo, a cada curva de nivel, eje en el grafo, se le asigna el valor correspondiente a la región más alta de las dos de las que la curva es frontera.

En la figura 5, por ejemplo, un recorrido que satisface las definiciones anteriores y que etiqueta correctamente todas las curvas de nivel en el mapa podría ser:

f-e-a-d-b-c-g-i-h-j-m-k-n-l

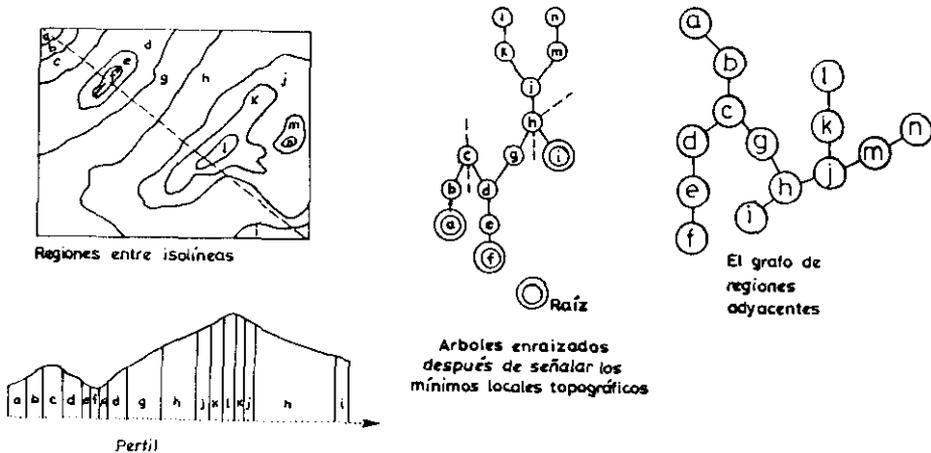


Figura 5.—Relaciones de orden en mapas topográficos.

En un lenguaje más algorítmico, el procedimiento se podría definir de la siguiente manera:

1. Lee el fichero que contiene las etiquetas de las regiones de los mínimos topográficos y sus altitudes, definidas por el operador... Haz una lista con ellas.
2. Mientras la lista no esté vacía:
 - 2.1. Ordena la lista de tal manera que una de las regiones de altitud mínima que no haya sido procesada todavía esté al comienzo de la lista.

2.2. Extrae el nodo que está al principio de la lista y localiza sus hijos en la matriz de regiones adyacentes. Etiqueta cada eje de padre a hijo con la altitud del momento, más el intervalo entre curvas.

2.3. Comprueba si cada hijo está ya, o no, en la lista. Si está en la lista y su elevación es la misma, no hagas nada. Si está en la lista pero su altitud es distinta, genera un mensaje de error y termina. Si no está en la lista, ponlo en la lista con la elevación definida en el paso anterior.

4.3. *Tratamiento de curvas de nivel que confluyen (en zonas de elevada pendiente) y de interrupciones en el dibujo de isolíneas*

Prestemos atención primeramente al problema de curvas que se confunden y observemos cómo este hecho se representa (fig. 6).

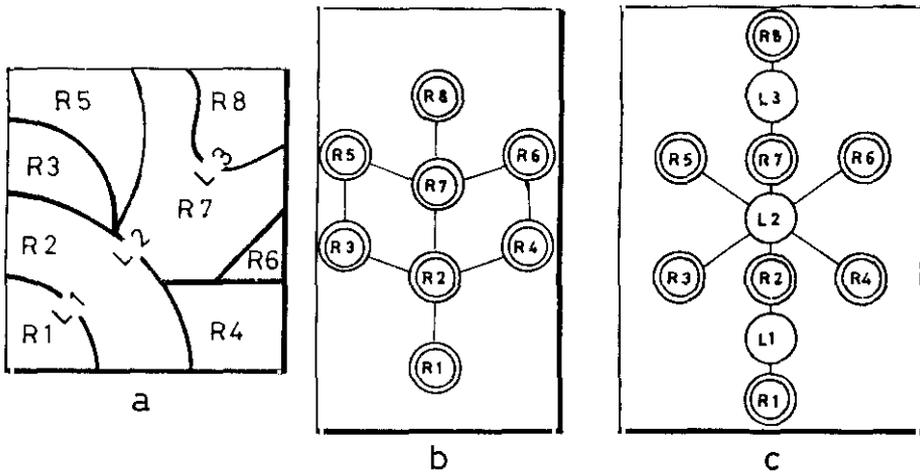


Figura 6.—Curvas de nivel que se funden.

En el caso de curvas que se confunden, la representación que proponíamos en una publicación anterior (Sircar y Cebrián, 1986) deja de ser un árbol (fig. 6b), mientras que la representación de Mark (1986) (fig. 6c) sigue siéndolo. A pesar de esta diferencia, ambas estructuras permiten un reconocimiento automático de las regiones relacionadas con el problema de curvas de nivel confluyentes. En la representación que proponíamos, las regiones en cuestión constituyen una componente doblemente conexa del grafo, y se pueden reconocer automáticamente. Para lograrlo, hemos utilizado con éxito el algoritmo de Baase (1978). En la representación de Mark (1986), cada vez que más de dos regiones entre isolíneas son adyacentes a la misma curva de nivel, podemos asumir que esta línea es el resultado de la fusión de

varias curvas de nivel, y que esas regiones son las relacionadas con el problema a resolver.

El reconocimiento de interrupciones en el dibujo de curvas de nivel sólo es posible en la estructura de datos propuesta por Mark (1986). Esto se debe al hecho de que las curvas de nivel son reconocidas como entidades (nodos, en el grafo, y regiones, en la imagen raster de componentes conexas). La figura 7 muestra este hecho.

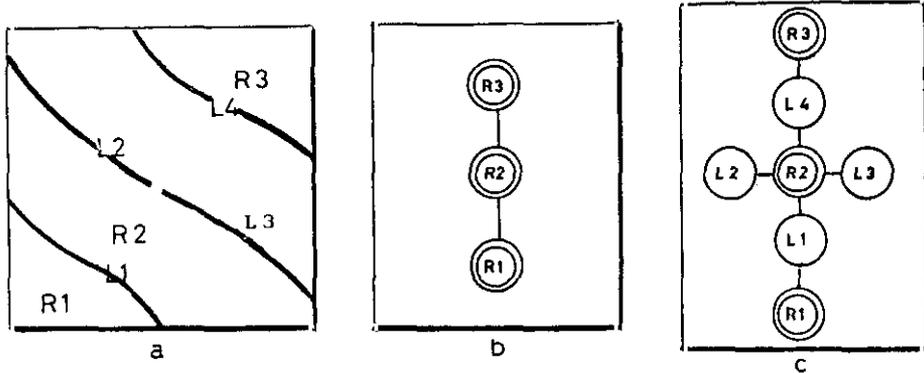


Figura 7.—Curvas de nivel cuyo trazado se interrumpe.

El reconocimiento de interrupciones en el dibujo de isolíneas en la estructura de Mark (1986) es el procedimiento dual del de reconocimiento de las curvas confluyentes. En este caso se intentan localizar las regiones entre isolíneas que sean adyacentes a más de dos curvas de nivel. Las curvas de nivel que sean adyacentes únicamente a una región entre isolíneas, son, con toda seguridad, fragmentos de curvas de nivel. Mediante una conveniente eliminación de vanos, dos o más de estos fragmentos se fusionarán en una sola curva de nivel.

Llegamos a la conclusión de que si las curvas de nivel no están fragmentadas, las dos estructuras de datos se comportan de forma similar, pero que si intentamos etiquetar el mapa sin eliminar primeramente los vanos, la estructura de datos elaborada por Mark (1986) es el único modo de detectar esas inconsistencias.

Para resolver el problema de etiquetar las curvas confluyentes asumimos que las regiones entre isolíneas afectadas por éste ya han sido detectadas, bien mediante la extracción de los componentes doblemente conexos del grafo, bien por medio de la selección de curvas de nivel que delimitan más de dos regiones. En cualquiera de los dos casos, sostenemos que para resolver el problema (bajo ciertas condiciones que explicaremos en breve) es necesario tratar el tema bajo nuestro enfoque, haciendo desaparecer, si hiciera falta, la curva de nivel en cuestión. La única información que hará po-

sible la reconstrucción de la topografía es la relación de adyacencia entre las regiones que se encuentran entre las curvas de nivel en cuestión.

Observemos el problema más de cerca y establezcamos los límites de la solución del mismo. ¿Qué sabemos de una zona de alta pendiente antes de indagar sobre su solución? Sabemos cuál es la región que se encuentra al pie del escarpe (la última región no problemática en la fig. 8 es R2), y también cuál es la que se encuentra en su copa (la región que nos permite abandonar el «laberinto»: R5 en la fig. 8). También conocemos qué regiones son adyacentes entre las que entran en juego.

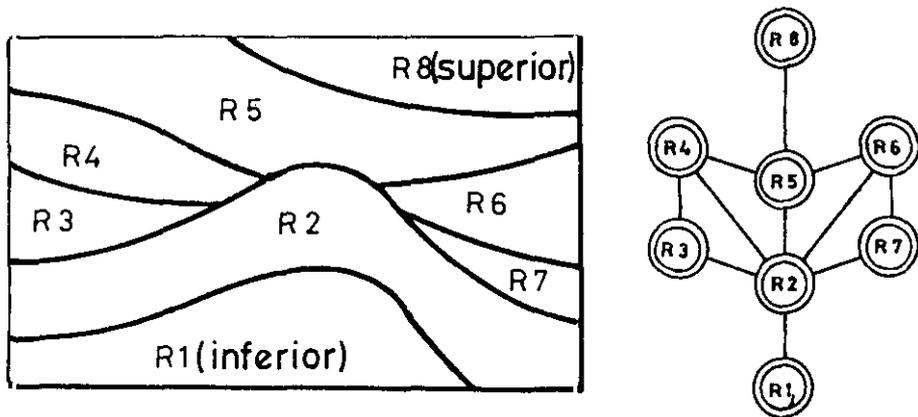


Figura 8.—Etiquetado de curvas confluyentes.

Esto quiere decir que el recorrido correcto de las regiones constará de caminos en el grafo de regiones adyacentes que empiecen en la región inferior y terminen en la superior. Ya tenemos, por tanto, el primer criterio para seleccionar alguno de los caminos que producirá el algoritmo de trazado de caminos. Otro criterio básico es que dos o más caminos que no se cruzan (es decir, que sólo comparten los nodos finales) y que recorren todo el escarpe de abajo arriba deben tener la misma longitud (o sea, incluir el mismo número de nodos) para ser etiquetados sin ambigüedad. Otro principio es que siempre que una región (en un camino que culmina el escarpe) pueda alcanzarse directamente desde el pie del escarpe o a través de otra región, la segunda alternativa deberá siempre considerarse como la correcta. La última definición es recursiva. Con otras palabras: sólo los caminos de longitud máxima, que empiecen en la región inferior y terminen en la superior, ofrecen soluciones correctas de asignación de altitudes. En circunstancias «normales» estos criterios dan soluciones correctas al problema¹.

¹ Nuestra propuesta de combinar un generador indiscriminante de trayectorias y un algoritmo de evaluación de las mismas, en base a las premisas ya expuestas, se basa en la experien-

En cualquier situación de vanos en curvas de nivel, las isolíneas en cuestión, en el caso de la estructura de datos propuesta por Mark (1986), son fácilmente reconocibles: se trata de curvas de nivel con una sola región adyacente (fig. 9).

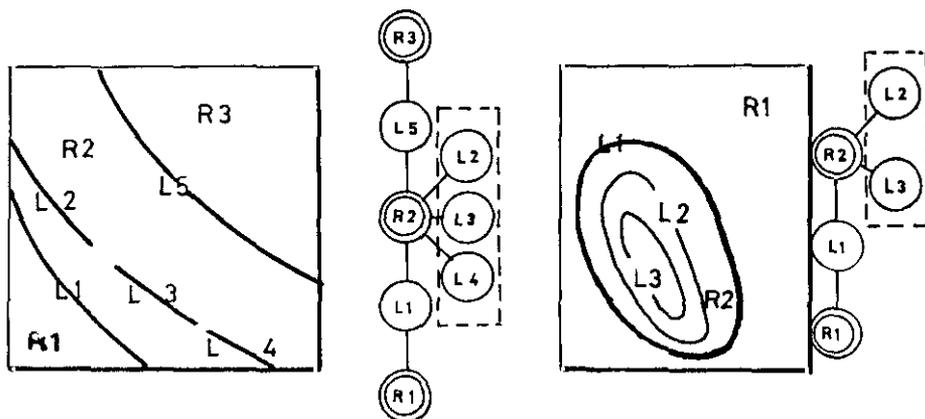


Figura 9.—Diversos escenarios de interrupción de trazado de curvas de nivel.

Proponemos a continuación la siguiente solución. Por cada región entre isolíneas que englobe una o más curvas de nivel, localicéense todos los puntos finales de esas curvas. Definase una ventana de pequeñas dimensiones y búsquense otros puntos extremos en el interior de una ventana de ese tamaño centrada en cada extremo en cuestión. Si se localizan más de dos extremos dentro de una misma ventana, vuélvase a definir el tamaño de la ventana, haciéndola más pequeña, y empiécese de nuevo. Cada vez que sólo dos puntos caigan en la misma ventana, únase los con una línea recta en la imagen raster. Vuélvase a marcar el enlace y los dos segmentos con la misma etiqueta. Incrementéense entonces el tamaño de la ventana y repítase la operación hasta que no quede ningún extremo por procesar. Etiquétense las nuevas componentes conexas generadas en el proceso y procédase a un nuevo análisis de regiones adyacentes. La expansión del tamaño de la ventana es un aspecto importante del algoritmo apuntado, porque evita fusiones incorrectas de segmentos.

cia de que todo escarpe en mapas de curvas de nivel sólo afecta a un número muy reducido de regiones. No podríamos aplicar este procedimiento a un grafo de mediana magnitud. (Se ha demostrado que la generación de todas las trayectorias en un grafo no tiene solución en tiempo razonable.)

5. INTERPOLACIÓN DE MTDs

El resultado de todo el proceso descrito es una imagen raster en la que los píxeles correspondientes a isolíneas recogen su correspondiente altitud y el resto de los píxeles el valor cero (fig. 10). Esta imagen todavía no es el resultado final. Hay dos alternativas posibles. La más sencilla consiste en vectorizar la imagen, mediante cualquier algoritmo de seguimiento de líneas, que produce una línea de salida tras otra, con sus marcas correspondientes. La descripción producida se puede guardar tal cual, o utilizar en la generación de MTDs de distinta resolución.

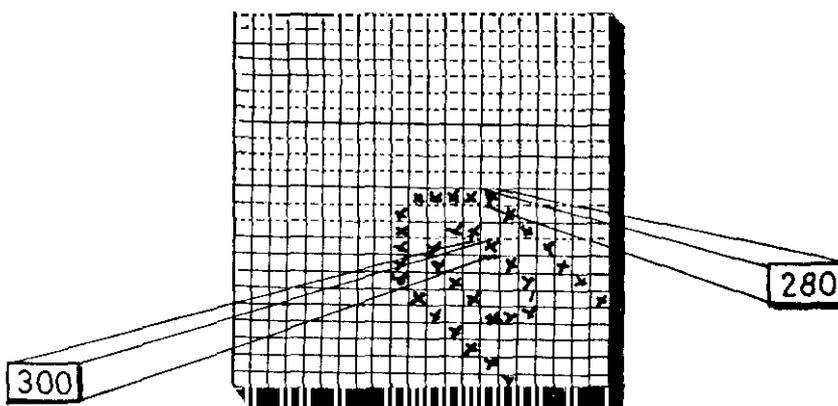


Figura 10.—Imagen raster de curvas de nivel.

Otra posibilidad sería generar un MTD a partir de esta imagen raster utilizando cualquiera de los algoritmos de interpolación específicos para curvas de nivel (Clarke *et al.*, 1982):

1. Interpolación lineal entre dos puntos (píxeles ya etiquetados) encontrados en cualquiera de las direcciones especificadas previamente. El número de ejes puede ser uno, dos o cuatro, lo que significa dos, cuatro u ocho puntos. En caso de que se encuentren más de dos puntos se calculará algún tipo de media de sus valores y se asignará al píxel en cuestión.

2. Interpolación lineal entre dos puntos que se encuentren en la dirección de la pendiente más pronunciada en el punto a interpolar. Las direcciones de búsqueda suelen siempre limitarse a los ejes de coordenadas y a dos ejes diagonales, aunque el algoritmo puede fácilmente generalizarse para un conjunto mayor de posibles direcciones.

3. Interpolación no lineal entre más de dos puntos que se encuentren en cualquier dirección apropiada (bien uno o más ejes predeterminados, bien la dirección de la pendiente más pronunciada), usando un polinomio de bajo grado (segundo o tercero).

4. Interpolación por mínimos cuadrados, que ajusta un plano a un grupo de píxeles cercanos pertenecientes a curvas de nivel, que se encuentra en direcciones determinadas previamente.

5. Algoritmos de proceso en paralelo (Clarke *et al.*, 1982) expone un ejemplo en el que las curvas se examinan sólo en la mitad del plano hacia la derecha de la columna que se procesa. Los puntos que se encuentran a la izquierda de esa columna, indispensable para realizar una interpolación lineal sobre el punto en cuestión, son o bien puntos ya interpolados, o puntos auxiliares derivados de aquéllos. Este tipo de estrategia de «barrido de plano» (Lee y Preparata, 1984) se adapta fácilmente a un procesamiento en paralelo, ya que el mapa topográfico se puede dividir en varios dominios y el algoritmo se puede aplicar a cada uno de ellos.

La figura 11, tomada de Clarke *et al.* (1982), presenta esquemáticamente los datos utilizados por cada tipo de algoritmo.

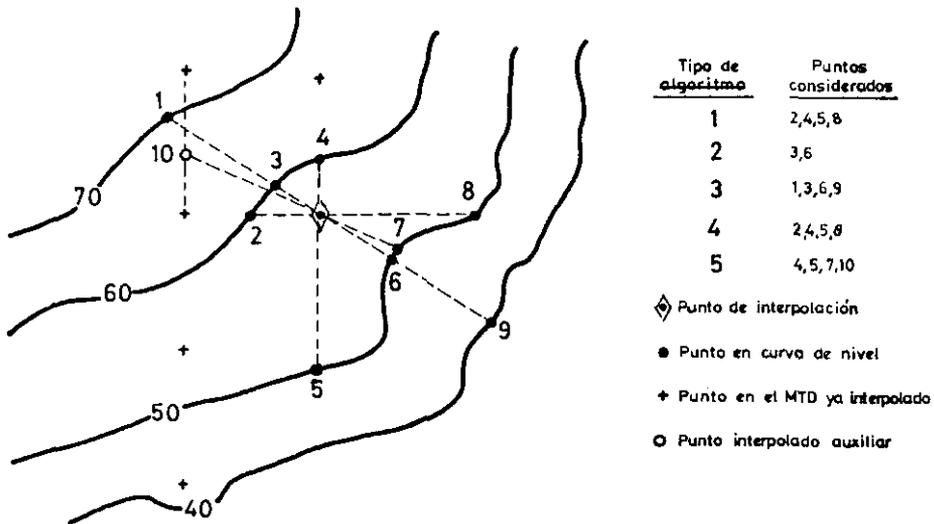


Figura 11.—Algoritmos de interpolación en MTDs.

Nosotros hemos experimentado con muchos de ellos, siendo los mejores resultados los correspondientes a la interpolación lineal a lo largo de la dirección de pendiente más pronunciada. De hecho, esto no causa sorpresa alguna, ya que este método es el que mejor imita el modo en el que el lector determina la altitud de cualquier punto en un mapa de curvas de nivel.

Por cierto, nosotros también hemos introducido en los MTDs algún punto (pico o depresión) y alguna línea (cauces fluviales) cuyas altitudes eran hasta cierto punto conocidas, después de que lleváramos a cabo la interpolación. Wong (1982) ha descrito un algoritmo no supervisado que no

sotros hemos utilizado para establecer adecuadamente el trazado de cada río en el proceso de creación de un MTD. Después de digitizar la posición de las coordenadas de cada segmento fluvial, la coordenada z de los nodos de la red se calcula como la media aritmética ponderada de los cuatro puntos de altitud más próximos. La coordenada z del resto de los puntos digitizados en la red se calcula sumiendo que la altitud cambia linealmente entre cada dos nodos. Por último, se vuelven a definir las alturas en una banda a lo largo de la red fluvial, dando por supuesto que la altitud cambia linealmente en las dos laderas del valle de cada corriente fluvial.

6. LA EDICIÓN DE MTDs

Cuando se habla de errores presentes en MTDs se debería tener en cuenta la distinción, recientemente apuntada por Doytsher y Shmutter (1986), entre datos geodéticos y datos topográficos. En primer lugar, mientras que un punto geodético se define sólo cuantitativamente (por coordenadas y altitud), un punto topográfico incluye con frecuencia información cualitativa. En segundo lugar y más importante, mientras un punto geodético se representa sólo a sí mismo, un punto topográfico no sólo representa su posición, sino también una porción de terreno a su alrededor. Una altitud individual en un MTD es, en cierto sentido, un dato superficial, más que puntual. Ciertos procesos utilizados en la producción de MTDs, tales como la interpolación, reafirman lo dicho. Esta es la razón por la cual la calidad de un MTD no se debería juzgar únicamente por la precisión de la altitud de cada uno de los puntos que los constituyen.

Una vez comprobada la exactitud vertical de las altitudes registradas en un MTD, se pueden utilizar algunos de los muchos procedimientos elaborados para detectar otros tipos de errores, aquellos que se refieren a la información geomorfológica contenida en el modelo. En el USGS se utilizan en la actualidad dos tipos principales de control (Alder *et al.*, 1982). Un tipo de pruebas evalúa las continuidades topográficas, detectando anomalías en los cambios de pendiente. Después se realiza la inspección y verificación visual de representaciones de MTDs en pantallas de rayos catódicos, pudiéndose interactivamente alterar los datos de base erróneos.

7. CONCLUSIONES

Hemos presentado en este artículo un nuevo enfoque de cómo tratar la automatización de la digitización de mapas topográficos digitizados y de cómo generar MTDs más eficientemente. La ventaja radica en la representación del problema bajo un nuevo esquema, que transforma el etiquetado de

las curvas de nivel en el recorrido de un grafo orientado. Creemos que la implementación del algoritmo presentado acelerará considerablemente el proceso de digitización en masa, en el que están involucradas todas las instituciones cartográficas hoy en día.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a Robert M. Ragan sus sugerencias durante el desarrollo del sistema. Los comentarios de David M. Mark y David M. Mount también han sido muy enriquecedores. Al programa Fulbright agradecemos la ayuda prestada a Juan A. Cebrián para trabajar en el Departamento de Geografía de la Universidad de Maryland. Gran parte de la financiación del proyecto ha sido facilitada por la NASA.

BIBLIOGRAFIA

- Allder, W. R.; Caruso, V. M.; Pearsall, R. A., y Troup, M. I. (1982): «An overview of digital elevation model production at the United States Geological Survey». *Proceedings, AutoCarto*, 5, págs. 23-32.
- Baase, S. (1978): *Computer Algorithms. Introduction to Design and Analysis*. Addison-Wesley, Reading (MASS), 286 págs.
- Boyll, R. L., y Ruston, H. (1963): «Hybrid Techniques for Realtime Radar Simulation». *Proceedings 1963 Fall Joint Computer Conference*. Las Vegas, Nevada.
- Cebrián, J. A., y Mark, D. M. (1986): «Modelos Topográficos Digitales», en *Métodos Cuantitativos en Geografía: Enseñanza, Investigación y Planeamiento*. Grupo de Métodos Cuantitativos (AGE), págs. 292-332.
- Clarke, A. L.; Gruen, A., y Loon, J. C. (1982): «The Application of Contour Data for Generating High Fidelity Grid Elevation Models». *Proceedings, AutoCarto*, 5, Cristal City (VA), págs. 213-222.
- Doyle, F. J. (1978): «Digital Terrain Models: An Overview». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 44, n.º 12, págs. 1481-1485.
- Doytsher, Y., y Shmutter, B. (1982): «Grids of Elevations and Topographic Maps». *Proceedings, AutoCarto*, 5, págs. 257-265.
- Freeman, H., y Morse, S. P. (1967): «On Searching a Contour Map for a Given Terrain elevation profile». *Journal of the Franklin Institute*, vol. 248, n.º 1.
- Gold, C., y Cormack, S. (1986): «Spatially Ordered Networks and Topographic Reconstructions». *Proceedings of the Second International Symposium on Spatial Data Handling*. Seattle (WA), July 1986, págs. 74-85.
- Lee, D. T., y Preparata, F. P. (1984): «Computational Geometry-A Survey». *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-33, n.º 12, págs. 1072-1101.
- Mark, D. M. (1978): «Topological Properties of Geographic Surfaces: Applications in Computer Cartography». *Harvard Papers on Geographic Information Systems*, vol. 5, 11 págs. Cambridge, Massachusetts.

- Mark, D. M. (1986): «Two Contour-Tagging Algorithms Based on the Contour Enclosure Tree». *Abstracts of the Canadian Cartographic Association Meeting*. Burnaby BC, June 1986.
- Merril, R. D. (1973): «Representation of Contours and Regions for Efficient Computer Search». *Communications of the ACM*, vol. 16, n.º 2, págs. 69-82.
- Morse, S. P. (1968): «A Mathematical Model for the Analysis of Contour-Line Data». *Journal of the ACM*, vol. 15, n.º 2, págs. 205-220.
- Morse, S. P. (1969): «Concepts of Use in Contour Map Processing». *Communications of the ACM*, vol. 12, n.º 3, págs. 147-152.
- Peuquet, D. J., y Boyle, A. R. (1983): *Raster Scanning, Processing and Plotting of Cartographic Documents*. Williamsville (NY), Spad Systems, Ltd., 122 págs.
- Pfaltz, J. L. (1976): «Surface Networks». *Geographical Analysis*, vol. 8, págs. 77-93.
- Roubal, J., y Poiker, T. K. (1985): «Automated Contour Labelling and the Contour Tree». *Proceedings, AutoCarto, 7*. Washington D.C., ACSM-ASPRS, March 1985, págs. 472-481.
- Sircar, J. K., y Cebrián, J. A. (1986): «Application of Image Processing Techniques to the Automated Labeling of Raster Digitized Contour Maps». *Proceedings of the Second International Symposium on Spatial Data Handling*. Seattle (WA), July 1986, págs. 171-184.
- Torlegard, K. (1981): «Photogrammetry and Digital Elevation Models, Present Status of Development and Application», invited paper, *38th Photogrammetric Week*. Stuttgart, October 1981.
- Wong, C. C. K. (1982): «Refinement of dense digital elevation models». *Proceedings, Auto-Carto, 5*, págs. 703-714.

RESUMEN

Resulta cada vez más evidente que la rasterización es el método más apropiado para la digitización de información gráfica en general y, por ello, también para la de documentos cartográficos. Este es el caso de la digitización de curvas de nivel, que es un paso importante, pero no el único, en el proceso de producción de modelos topográficos digitales, cuya confección requiere más elaboración. Concretamente, una de las operaciones que requiere más tiempo es la de etiquetar las curvas de nivel digitizadas (asignar a cada una la altitud correspondiente). Hasta el presente, la práctica habitual es la de vectorizar las descripciones raster de las curvas y etiquetar posteriormente las cadenas resultantes de este proceso recurriendo a técnicas gráficas interactivas (apuntando en pantalla, mediante cursor, a cada curva, o también a determinadas familias de curvas adyacentes, introduciendo posteriormente, mediante teclado, su altitud).

Este artículo presenta los componentes más destacados de un método de etiquetado cuasi automático de curvas de nivel de un mapa topográfico. El método requiere una supervisión notablemente menor que la que requieren los métodos en uso en la actualidad, propiciando así un incremento potencial del ritmo de creación de modelos topográficos digitales.

Por la propia naturaleza de los mapas topográficos de curvas de nivel, las zonas definidas por las curvas son regiones de altitud homogénea (a la escala determinada por el intervalo entre curvas del mapa, obviamente). Desde este punto de vista, las curvas de nivel no son otra cosa que bordes de zonas de altitud homogénea.

El etiquetado de las curvas de nivel se realiza en formato raster, aplicando métodos de detección y medida de bordes, de expansión de regiones y de reconocimiento de componentes conexas, a la representación de las curvas de nivel, para construir una descripción topológica exhaustiva de la imagen: un grafo, que se recorre nodo a nodo para calificar adecuadamente a cada curva. El recorrido del grafo se inicia suministrando al programa una sola vez, al comienzo de todo el proceso, una pequeña dosis de información relacionada con las características del mapa.

En un último apartado se presentan y se analizan procedimientos para generar modelos topográficos digitales rectangulares a partir de la imagen raster de las curvas de nivel ya etiquetadas.

RESUME

C'est bien évident aujourd'hui que la numérisation raster est le meilleur méthode pour capter information graphique en général et information cartographique en particulier. Cela s'applique aussi à la numérisation des isohypses des cartes topographiques, dans l'élaboration des modèles numériques d'élévation. Après avoir numérisé les isohypses (suivant n'importe quel méthode, raster ou vector) on doit les assigner s'altitude spécifique. Les méthodes courants les étiquettent après les avoir pointé à l'écran.

Nous présentons dans cet article un nouveau méthode d'étiqueter isohypses presque automatiquement, réduisant l'intervention de l'opérateur. Le méthode étiquete les courbes en format raster. Les régions entre courbes sont reconnues et après ça le graphe de leur voisinage est construit. Dans ce graphe les régions d'altitude homogène sont représentées par les nodes et les isohypses par les unions. En partant des régions d'altitude minimal le graphe est complètement traversé, en assignant à chaque union (isohypse) l'altitude correcte.

Divers méthodes de construction de modèles numériques d'élévation à partir d'une image raster d'isohypses déjà étiquetées sont adressés dans la dernière partie de l'article.

ABSTRACT

It is increasingly apparent that raster scanning is gradually emerging as an attractive technique for the capture of cartographic data. This is also the case of contour-line digitizing. However, the conversion of digitized line maps representing contour lines into a digital elevation data base invariably requires substantive preprocessing. One of the most time consuming operations is the labeling of the digital lines. Current practices vectorize the raster descriptions of the contour separates and label the resulting files by means of interactive computer graphics techniques.

This paper presents a «batch oriented» technique to perform semi-automatic contour labeling. Such a technique will largely reduce time-consuming and expensive operator interaction.

According to the nature of topographic contour maps, the regions enclosed by contour lines are homogeneous regions of elevations within the range determined by the contour interval of the map. Contour lines may then be regarded as the edges of such elevation regions.

The tagging of contour lines is handled while maintaining the data base in raster format. Connected components labeling, region growing, and edge detection and measurement methods are applied to the raster description of the contour separate of a topographic map, building the exhaustive topological description of the image.

The topological description of the image, is stored in a graph structure, which is then traversed to accomplish the correct labeling of every contour. The graph traversal is triggered by a small amount of information related to the map characteristics that is provided in a batch form to the entire process.

Finally, procedures to generate a square grid digital elevation model (DEM) from the raster image of the tagged contour lines are also presented and discussed.