Ordenamiento del Territorio y Medio Marino. V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección.
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria - Servicio de Publicaciones.
Las Palmas de Gran Canaria, 10, 11 y 12 de noviembre de 1993. pp. 971-986.
Editor: Manuel Cantón Garbín.

Estimación de densidades de drenaje a partir de imágenes de satélite

M.J. López García[1] y J.B. Thornes[2]
(1) Departament de Geografía
Universitat de Valencia
(2) Department of Geography, King's College
University of London

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar las posibilidades de las imágenes Landsat TM y SPOT para la determinación de la densidad de drenaje en zonas semiáridas, en tanto constituye un importante parámetro en el desarrollo de los modelos de erosión, hidrológicos y ecológicos. El trabajo analiza dos zonas: la cuenca de Albudeite (Murcia), paisaje tipo badlands dominado por flujo superficial y caracterizado por densidades de drenaje altas, y Belmonte (Cuenca) dominada por flujo subsuperficial y densidades de drenaje bajas. Los resultados son altamente dependientes de la escala de trabajo y de las condiciones del medio. Se obtuvieron resultados satisfactorios cuando la densidad de drenaje se calcula en base a unidades superiores a 0,36 km^2 y en zonas muy diseccionadas con escasa cubierta vegetal.

ABSTRACT

This paper explores and evaluates the use of SPOT and Lansat TM imagery for estimating drainage density in semiarid regions. Two study areas have been used, one dominated by overland flow and high drainage density, the other by subsurface draingae and relatively low drainage density. Preliminary results show that the methods are highly scale dependent. Good results have been obtained when calculating drainage density for support areas greater than 0.36 km^2 in highly dissected areas with low vegetation cover and significant overland flow, where the major contribution to image brightness is from surface topography.

Introducción

La densidad de drenaje, longitud de los cauces por unidad de área, es un parámetro complejo y de gran importancia en la caracterización de las cuencas hidrográficas. Es una propiedad que puede considerarse reflejo del clima, suelo y litología, cubierta vegetal y degradación del suelo. Constituye un parámetro crítico para la determinación de la escorrentía y las tasas de transporte de sedimentos. Como demuestran diversos estudios llevados a cabo desde la década de los sesenta (Carlston, 1963, Gregory y Walling, 1968; Calver, Kirkby y Weyman, 1972), el incremento en la densidad de drenaje supone una reducción de la escorrentía en manto y la hidrología

de laderas así como del tiempo de concentración del hidrograma. En zonas erosivas, un aumento de la densidad de drenaje supone, además, un aumento de la carga de sedimentos. Es más, bajo condiciones climáticas e hidrológicas constantes, la densidad de drenaje se ajusta a las condiciones de equilibrio que se establecen por el balance entre la erosión remontante en cabecera y el relleno deposicional provocado por los procesos de erosión en las vertientes. En consecuencia, podemos decir que la densidad de drenaje es un indicador muy sensible del impacto provocado ya sea por los cambios climáticos o por la actividad humana en los procesos hidrológicos y erosivos del territorio. Varios son los trabajos que intentan modelizar la densidad de drenaje como respuesta a estos efectos (Kirkby, 1980; Willgoose, Bras y RodríguezIturbe, 1991) y, en la actualidad, no cabe duda de que la densidad de drenaje se ha convertido en un parámetro de suma importancia tanto como entrada en los modelos hidrológicos y de erosión, como un parámetro definitorio de las condiciones de partida de los modelos.

La determinación de la densidad de drenaje se ha realizado tradicionalmente a partir de mapas topográficos o fotografías aéreas. Es un trabajo manual, lento y laborioso que implica una clara dependencia de la densidad de drenaje respecto a la escala del documento utilizado. Además, la cartografía y los fotogramas a escalas adecuadas no siempre se hallan disponibles para amplias zonas del planeta. Nuestro objetivo en este trabajo consiste en determinar la densidad de drenaje a partir de las imágenes de satélite de una forma operativa, evitando así los problemas derivados de la disponibilidad de cartografía y fotos aéreas y de su extracción manual. Nuestro trabajo se ha restringido a zonas áridas y semiáridas las cuales presentan unas características muy particulares.

La aplicación de las técnicas de teledetección para obtener información fisiográfica de las cuencas fluviales data de las dos últimas décadas. Trabajos pioneros como el de Parry y Turner (1971) mostraron las ventajas de la fotografía infrarroja para la detección y delineación de cauces. Las imágenes proporcionadas por la primera generación de Landsat (MSS) pronto se mostraron adecuadas para la planimetría de sistemas de drenaje a pequeña escala (Rango *et al.*, 1975, Killpack y McCoy, 1981, Astaras, 1985, Chidley y Drayton, 1986a), pero su resolución espacial era insuficiente para detectar los canales más pequeños. Más tarde, las mejoras en la resolución espacial de las imágenes Landsat TM (30 m) y SPOT (10 m y 20 m para el sensor pancromático y multiespectral respectivamente) abrió nuevas expectativas para los hidrólogos. Chidley y Drayton (1986b) utilizando simulaciones SPOT llegaron a identificar correctamente el 60% de la red de drenaje que aparece en la cartografía a escala 1:50.000 de una gran variedad de paisajes en Wales (U.K.). Utilizando la banda 3 (infrarrojo próximo) llegaron a identificar superficies acuosas de menos de 0,5 ha. Astaras *et al. (1990)* realizaron un análisis com-

parado entre el sistema de drenaje obtenido a partir de la mejor cartografía disponible (1:50.000) y el obtenido a partir de imágenes RBV, TM y pares estereoscópicos de SPOT pancromático, para Macedonia Central (Grecia). Como resultado obtuvieron que las imágenes (SPOT, TM, RBV) mostraban respectivamente el 128, 127 y 87% de la densidad de drenaje obtenida en los mapas. Las imágenes estereoscópicas SPOT superaban ligeramente al TM. La mejor resolución espectral del TM compensaba las ventajas de la mejor resolución espacial del SPOT, aunque no las de la visión estereoscópica. La banda 7 del TM ofrecía las mejores posibilidades para la detección de líneas de drenaje.

La mayoría de estos trabajos tienen en común el uso de un método para la extracción de la red de drenaje basado en la interpretación visual de las imágenes, y la mayoría destacan la importancia que las características del terreno (existencia de agua en los canales, la existencia o no de vegetación en canales e interfluvios y el aspecto de la misma, la topografía, el grado de disección de la red) en los resultados obtenidos. Rango *etal.* (1975) concluyó que las redes de drenaje se detectaban bien en zonas bien diseccionadas pero era difícil la detección de cauces de bajo orden en zonas cubiertas de vegetación con escaso relieve o en zonas donde el desarrollo de la red es escaso. Algunos autores (Killpack y McCoy, 1981 y Astaras, 1985) señalaron que se obtienen mejores resultados en terrenos diseccionados y utilizando imágenes tomadas con un ángulo solar bajo, hecho que acentúa el efecto del relieve y facilita el reconocimiento de las líneas de drenaje.

Sin embargo, no existe un acuerdo general sobre la adecuación de una fecha de imagen determinada ya que las formas del terreno varían de una zona de estudio a otra e incluso dentro de la misma cuenca fluvial. Puesto que los resultados son altamente dependientes de las características del terreno, parece necesario un tipo de análisis adecuado para cada tipo de ambiente. Aunque se han señalado un número importante de estudios sobre redes de drenaje, hay muy pocos que traten de la detección de redes en ambientes semiáridos o áridos. Gardner *et al.* (1989) utilizaron imágenes SPOT pancromáticas para detectar redes fluviales de carácter efímero en un terreno de bajo relieve en abanicos aluviales, en una cuenca de 33 km' en zonas áridas del SW de los Estados Unidos. El contraste entre el alto albedo de la superficie del abanico y los canales permitió la detección de algunos de los tributarios menores (menos de 2 m de ancho) de menor orden. Mediante técnicas de clasificación pudo identificar correctamente el 81% de los canales.

El objetivo de este trabajo es explorar la utilidad de las imágenes de satélite de alta resolución espacial (Landsat TM y SPOT) para la determinación de la densidad de drenaje como una entrada necesaria para los modelos de erosión en zonas semiáridas. Dedicaremos especial atención a la evaluación de la significación espacial de

los resultados y a la cuantificación de los errores con los que se obtiene este parámetro. En esta comunicación se presentan los primeros resultados obtenidos en nuestro proyecto.

Zona de estudio

Para la consecución de nuestros objetivos se han seleccionado dos zonas de estudio: la cuenca de la Rambla de Albudeite en Murcia y una zona próxima a Belmonte (Cuenca). La cuenca de drenaje de Albudeite, situada a unos 15 km al noroeste de Murcia, ocupa aproximadamente 19 km' en un sustrato de margas muy diseccionadas. La precipitación media anual es de 300 mm con una acusada estacionalidad (septiembre-octubre y abril-mayo) y elevadas tasas de evapotranspiración y evaporación potencial. La conductividad del suelo saturado es de 10-4-10-6 cm/seg y las tasas de infiltración inferiores a 1 cm/h. Constituye un paisaje tipo *badlands* donde predomina la escorrentía superficial y donde la densidad de drenaje media es de 13 K^{-1}, si bien en algunas zonas se alcanzan valores de 60-80 km^{-1} (Figura 1). Esta zona está siendo estudiada dentro del programa europeo MEDALUS.

La zona de Belmonte pertenece a la cuenca alta del Záncara. Los suelos son sedimentos aluviales margosos pedregosos desarrollados sobre un sustrato calizo, con conductividades de 10-2 cm/s y tasas de infiltración de 4-10 cm/h. La precipitación media anual es también de 300 mm pero ésta es una zona más fría con tasas de evapotranspiración más bajas. En esta zona predomina un flujo subsuperficial siendo el flujo superficial muy infrecuente. La densidad de drenaje media es de 6 km^{-1} (Figura 2). El fondo de los cauces, de formas muy suaves, aparece relleno de coluviones donde la incisión sólo es patente en episodios de lluvias intensas. La zona de Belmonte está siendo estudiada dentro del programa EFEDA.

Metodología

Dado que nuestro objetivo consiste en determinar la densidad de drenaje en tanto constituye una entrada en los modelos de erosión necesitamos estimar este valor en el conjunto del espacio. No estamos especialmente interesados en la delineación exacta de la red de drenaje sino en obtener a partir de la imagen un parámetro espacial que se aproxime al valor real de la densidad de drenaje. Para la extracción de este parámetro se han empleado diferentes técnicas de tratamiento digital de imagen: niveles de intensidad, análisis de textura, filtros, componentes principales, que realzan la información contenida en las imágenes. El resultado final de los tratamientos consiste en la obtención de una imagen binaria donde se asigna valor 0 a los píxeles correspondientes a los cauces y valor 1 a los píxeles del fondo.

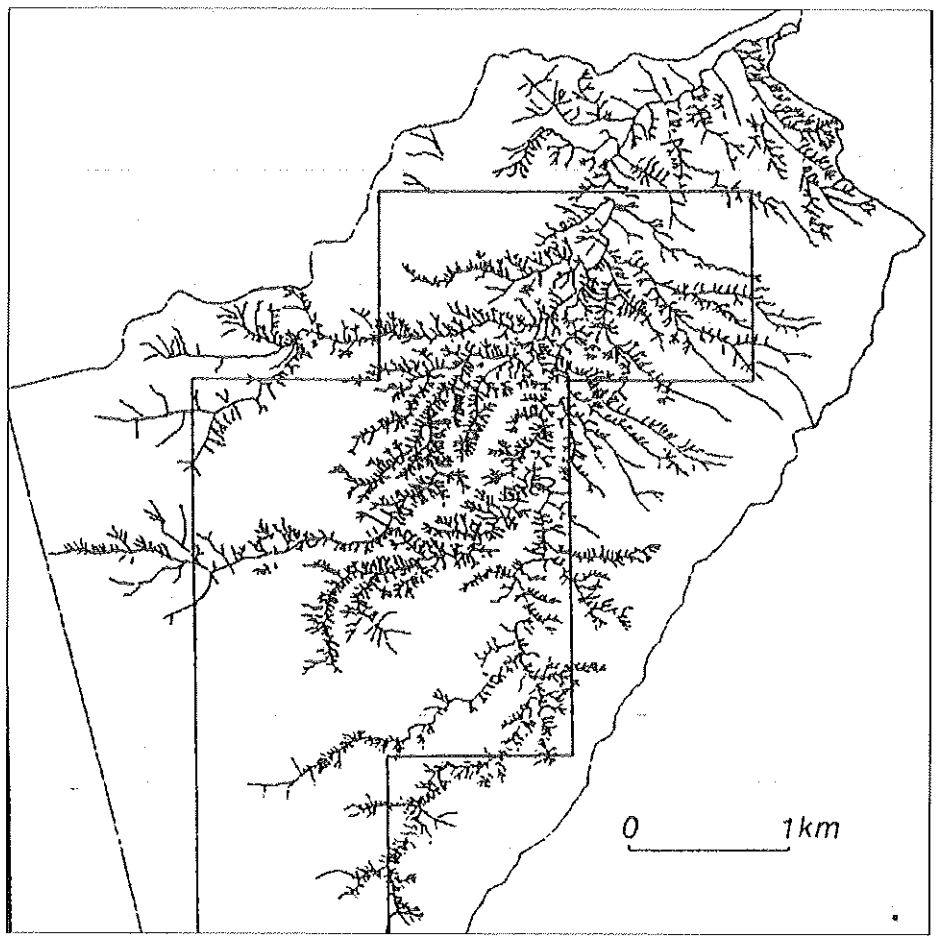

FIGURA 1
Mapa de la red de drenaje en la zona de estudio de Albudeite.
Sobre el mapa se ha señalado la zona utilizada en el estudio

Para obtener los valores de densidad de drenaje en el espacio se necesita establecer una unidad superficial en la cual se calculará la densidad de drenaje. Hemos utilizado una retícula que se superpone a la imagen y donde se calcula para cada celdilla el número de píxeles con valor 0 (superficie correspondiente a los cauces) dividido por el número total de píxeles en la celdilla. Para convertir este valor en densidad de drenaje (km^{-1}) bastará multiplicarlo por un factor que variará dependiendo de la resolución espacial del píxel. A efectos de realizar un análisis exhaustivo de la utilidad del método a diferentes escalas se ha calculado la densidad de drenaje utilizando unidades superficiales de distinto tamaño. Así

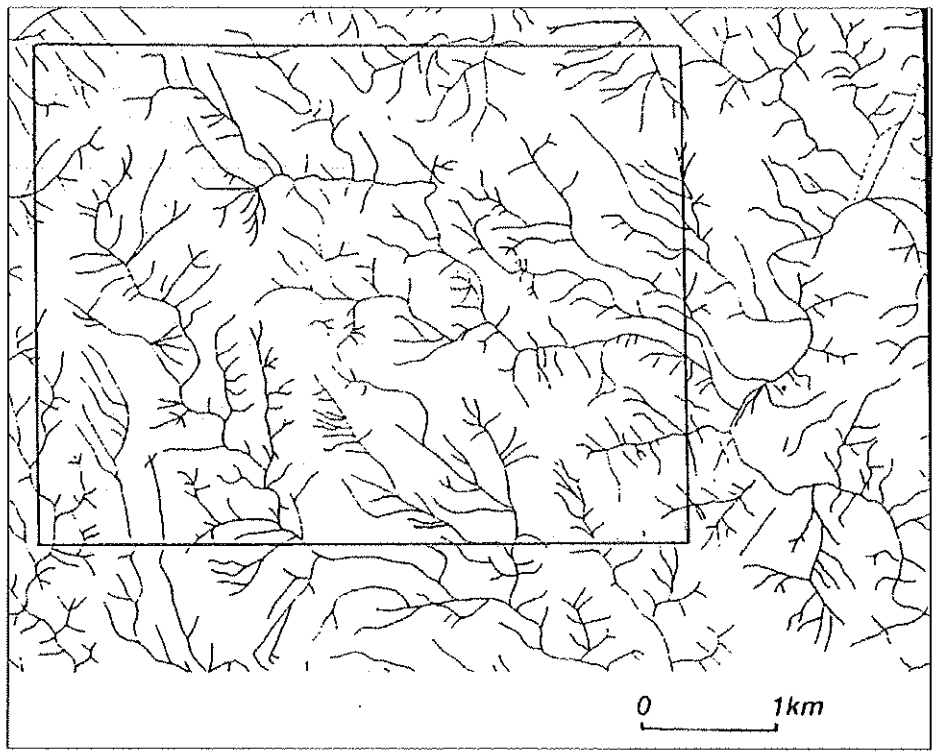

FIGURA 2
Mapa de la red de drenaje en la zona de estudio de Belmonte.
Sobre el mapa se ha señalado la zona utilizada en el estudio

pues, el análisis se repitió para retículas con tamaños de celda de 40, 80, 120, 240, 300, 600 y 1200 m.

Para comprobar la validez del método, los valores de densidad de drenaje obtenidos a partir de las imágenes se comparan con los valores de densidad de drenaje considerados verdaderos (verdad-terreno). Estos valores se obtuvieron a partir de un mapa de la red de drenaje producido por fotointerpretación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. Para la zona de Albudeite se dispuso de un vuelo a escala 1:18.000 y para Belmonte a escala 1:20.000. Los mapas resultantes fueron convertidos a formato digital raster con un tamaño de píxel de 7 m. Las imágenes fueron registradas respecto al mapa para lograr la perfecta superposición mapa/imagen con un error en todos los casos inferior a 1 píxel. No obstante cada uno de los documentos conservó su resolución espacial original y su escala. La densidad de drenaje considerada «verdadera» se calculó a partir del mapa digitalizado al igual que se ha descrito para las imágenes, esto es, número de píxeles

identificados como canales dividido por el número total de píxeles en la celdilla, repitiéndose el análisis para los diferentes tamaños de celdilla. Las figuras 1 y 2 muestran respectivamente los mapas de las redes de drenaje de Albudeite y Belmonte elaborados a partir de la fotointerpretación. La superficie utilizada en el análisis ha sido señalada en ambas figuras: 10,08 km' para Albudeite y 17,28 km' para Belmonte.

Para comparar la densidad de drenaje obtenida a partir de las imágenes con la densidad de drenaje «verdadera» se han utilizado técnicas de regresión lineal. Se realizaron diferentes apuntes para cada tamaño de celda. El coeficiente de correlación y el error estándar de estimación se utilizaron como indicadores de la bondad de los ajustes.

Resultados

Zona de Albudeite

Para el análisis de la zona de Albudeite se analizaron las siguientes imágenes: SPOT-PA (pancromático) y SPOT-MSS del 13 de abril de 1987, SPOT-MSS del 23 de septiembre de 1986 y Landsat-5 TM del 14 de septiembre de 1987.

Para la extracción de la red de drenaje, en el caso de la imagen SPOT-PA se utilizaron técnicas de reforzamiento de bordes y análisis de textura. En el primer caso, se aplicó un filtro laplaciano a la imagen en una ventana de 3 x 3 píxeles y los bordes se extrajeron aplicando 3 umbrales diferentes: 10, 20 y 30% de los bordes. El filtro laplaciano fue elegido como el método más idóneo para la extracción de los rasgos lineales de la imagen ya que aumenta los gradientes en todas las direcciones lo que es adecuado para la red fluvial que en principio no presenta una dirección predominante. Dado que no aparecen otros elementos lineales en la imagen tales como carreteras, caminos o linderos, los rasgos lineales extraídos se consideraron representativos de los cauces. La figura 3 muestra un ejemplo de una de las imágenes binaria obtenida, a partir de la cual se calcularon los valores de densidad de drenaje para cada retícula. El tamaño mínimo de celda empleado fue 40 m x 40 m lo que corresponde a celdas de 4 x 4 píxeles en la imagen y 6 x 6 píxeles en el mapa. De igual modo, en el caso del análisis textural de la imagen, un valor de textura se calculó para cada celdilla de la retícula.

La comparación de los valores calculados con los valores de densidad de drenaje verdaderos mostró que los mejores resultados se obtenían utilizando la imagen con un filtro laplaciano y un 20% de bordes. En el caso del análisis textural los ajustes fueron muy pobres. En la figura 4 se muestran los ajustes obtenidos entre la densidad de drenaje calculada a partir de la imagen y los valores de densidad de drenaje verdaderos para tamaños de celda de 40, 120, 240, 300 y 600 y 1200 m. Para mayor

tamaño de celda, el coeficiente de correlación aumenta, esto es, para cálculos correspondientes a escalas más groseras la imagen proporciona una mejor aproximación a la densidad de drenaje obtenida a partir del mapa.

Esta misma técnica de extracción de bordes se aplicó a imágenes SPOT-MSS en sus tres bandas. El tamaño mínimo de las celdas en este caso fue 80 m x 80 m (4 x 4 píxeles) ya que la resolución espacial de estas imágenes es de 20 m. Los mejores resultados se obtuvieron aplicando el filtro laplaciano con un umbral del 20% a la banda 3 (790-890 nm) aunque la diferencia con los resultados obtenidos para las otras bandas apenas es significativa.

Para el análisis de la imagen Landsat TM, se investigaron diversas técnicas de procesado de imagen. El análisis previo de las respuesta espectral de los cauces en todas las bandas del sensor mostró que las mayores diferencias en la reflectividad entre la respuesta de los cauces y el resto de la imagen se producían en el infrarrojo medio, banda 5 (1.550-1.750 nm) con un 40% de diferencia, seguido por la banda 7 (2.080-2.350 nm) con un 14% de diferencia. Se produjo una imagen binaria a partir de la banda 5 de manera que fueran visibles los canales. Igualmente se creó una composición con los componentes principales CP1, CP2 y CP4 que concentraban el máximo de información. Finalmente se aplicó el filtro laplaciano a cada una de las bandas con umbrales del 10, 20 y 30%. La comparación con los valores de densidad de drenaje verdaderos mostró que los mejores resultados se obtenían con las bandas 5 y 7 nuevamente mediante extracción de bordes con el uso del filtro laplaciano y un 20% de extracción de bordes. La figura 5 muestra los ajustes obtenidos para la banda 5 del Landsat TM. En el caso de las imágenes Landsat de 30 m de resolución espacial el tamaño mínimo de la celda utilizada fue de 120 m x 120 m (4 x 4 píxeles).

Como resumen de los resultados obtenidos en la zona de Albudeite, en la figura 6 se ha representado, para cada tamaño de celda y para cada una de las imágenes utilizadas, el error estándar de estimación de la densidad de drenaje (km-l) obtenido en los mejores ajustes lineales. Podemos observar que las imágenes SPOT-MSS y Landsat TM presentan mejores resultados que los obtenidos con la imagen SPOT pancromático que tiene una mejor resolución espacial. La razón parece deberse a que en el primer caso las imágenes son de septiembre, cuando el bajo ángulo de elevación del sol magnífica las sombras en el relieve y facilita la detección de las líneas de drenaje en zonas diseccionadas como Albudeite. Los resultados obtenidos con la imagen SPOT-PA y SPOT MSS, ambas del 13 de abril de 1987, son muy similares por lo que no parece ser relevante la mejor resolución espacial de la imagen pancromática. De todo ello parece concluirse que el método es más sensible a la fecha de adquisición de la imagen que a otros factores tales como la resolución espacial.

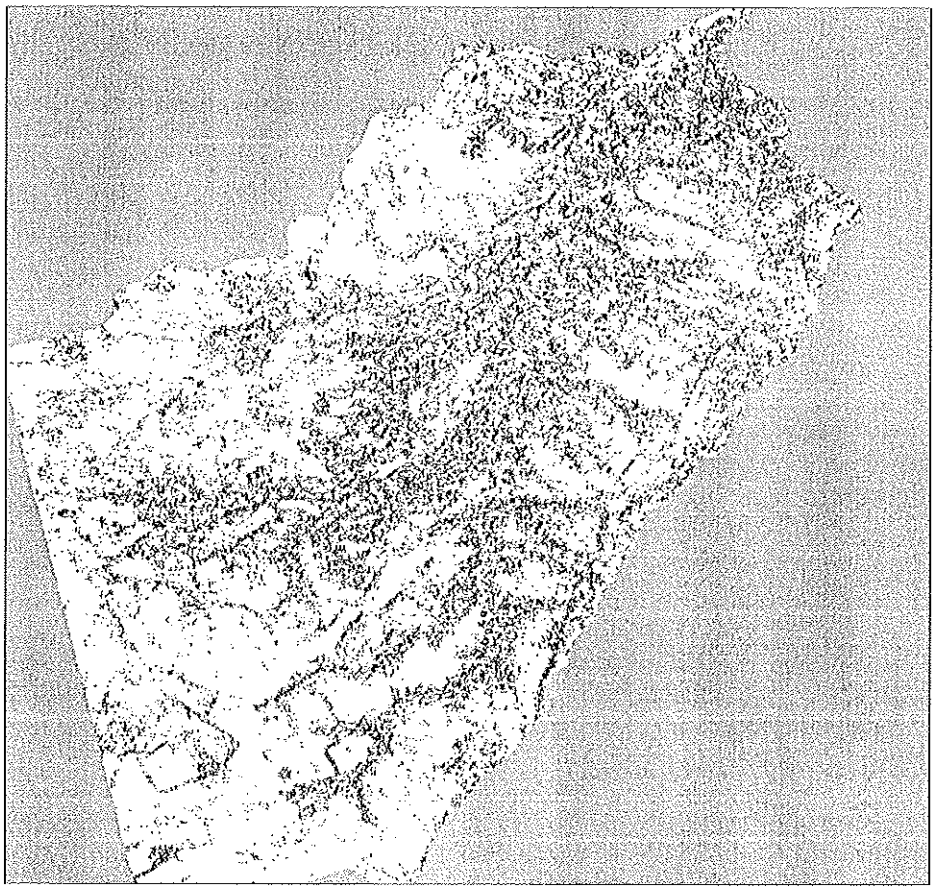

FIGURA 3
Imagen binaria SPOT-pancromática de 13 de abril de 1987 producida mediante la aplicación de un filtro laplaciano

De los resultados también se deduce que los errores disminuyen sensiblemente al aumentar el tamaño de las celdillas utilizadas. El hecho de incrementar el tamaño de la celdilla para el cálculo de la densidad de drenaje no supone obviamente un incremento en la información contenida en la imagen, más bien lo que ocurre es que disminuye la importancia relativa de los canales de primer orden en el cómputo de la densidad de drenaje y como estos canales no son recogidos en la imagen la correlación es mejor. Los errores (véase figura 6) que son importantes cuando utilizamos el tamaño inferior de celda (14,3 km^{-1} para SPOT-PA en celdas de 40 m x 40 m; 9,4 km^{-1} para SPOT-MSS en celdas de 80 m x 80 m y 7,8 km^{-1} para Landsat-TM en celdas de 120 m x 120 m) se reduce a 3,3, 1,8 y 1,5 km-1 respectivamente cuando calculamos la densidad de drenaje en áreas

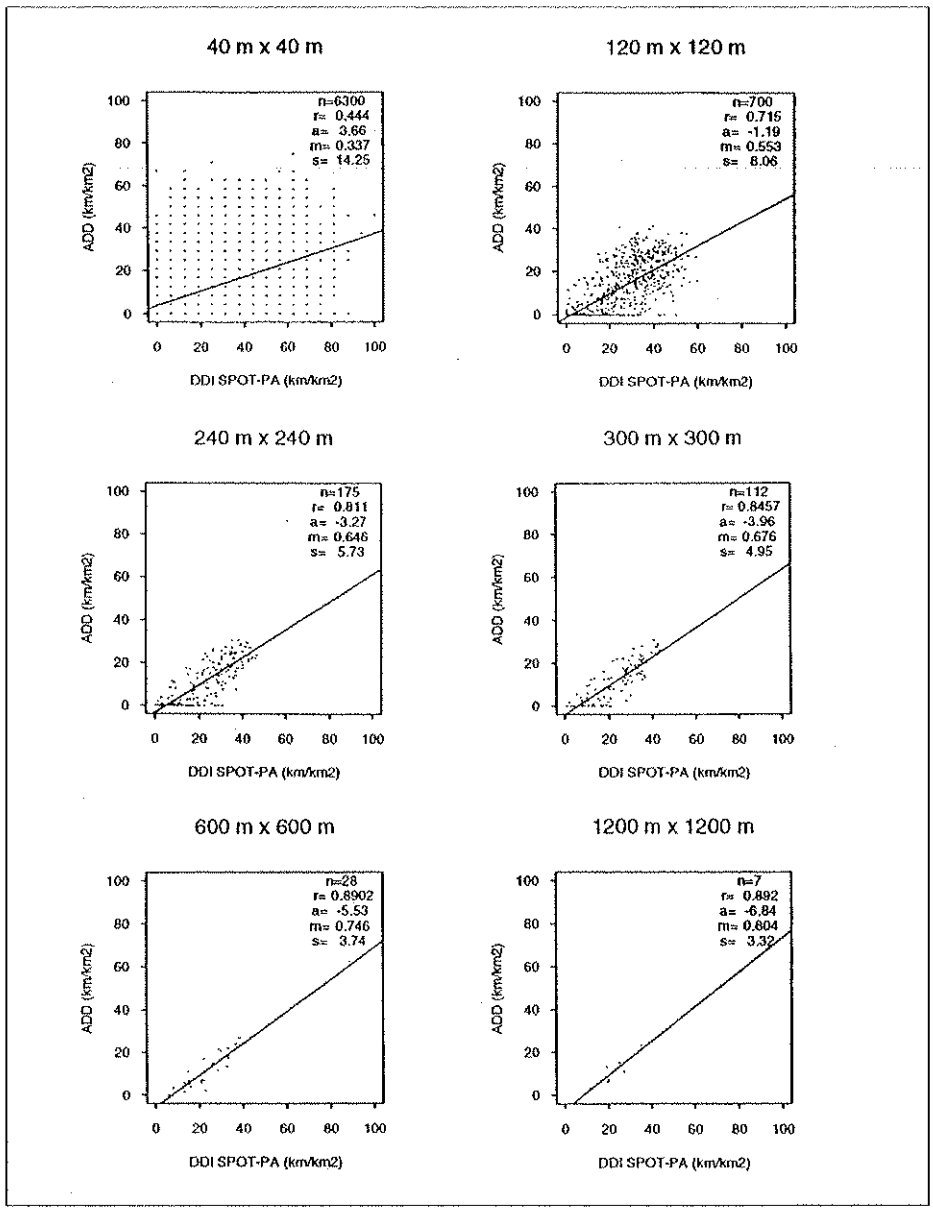

FIGURA 4

Ejemplo de alguno de los ajustes lineales entre la densidad de drenaje «verdadera» (ADD) y la densidad de drenaje calculada a partir de la imagen (IDD) para la imagen SPOT pancromático de 13 de abril de 1987 de Albudeite (n: número de puntos, r: coeficiente de correlación, a: ordenada en el origen, m: pendiente de la recta, s: error estándar de estimación)

de 1200 m x 1200 m. La cuestión estriba en con que error se necesita obtener la densidad de drenaje para los modelos de erosión. El menor tamaño de celda que mantiene un buen ajuste es el de 0,06 km' para imágenes de otoño. Para un tamaño de celda de 1 km como el que se utiliza en el modelo SHE, la densidad de drenaje obtenida en la imagen correlaciona casi perfectamente con la densidad de drenaje obtenida en el mapa.

La significación de los resultados parece hallarse en el control que la densidad de drenaje ejerce sobre la trayectoria del canal, a través de la distribución de la longitud de los cauces al punto de concentración y el tiempo de retraso de la escorrentía de laderas. Esta última está indirectamente controlada por la densidad de drenaje a través de la longitud de las laderas que es inversamente proporcional a la densidad de drenaje. Existe la necesidad de establecer un compromiso entre el tamaño de celda suficientemente pequeño para que sea adecuado en la obtención del máximo de precisión en la determinación del flujo en cuencas extensas (por ejemplo al utilizar el Hidrograma Geomorfológico Unitario, G.U.H.) y el tamaño de celda donde la estimación de la densidad de drenaje a partir de las imágenes de satélites sea significativa. Los datos sugieren que para Albudeite probablemente esto se alcance para celdas de 300 m x 300 m. Para una zona dada, al aumentar la densidad de drenaje el pico de descarga parece incrementarse aproximadamente la densidad de drenaje elevado a 2,5 (Calver, Kirkby y Weyman, 1972).

Estos resultados demuestran la existencia de una fuerte relación lineal entre la densidad de drenaje extraída a partir de la imagen para unidades espaciales superiores a 0,36 km', independientemente del tipo de imagen utilizada, fecha de la imagen o ángulo solar. Sin embargo, para determinar la relación absoluta existente entre la densidad de drenaje extraída de la imagen y la densidad de drenaje «verdadera», será necesario establecer una calibración ya que el ratio densidad de drenaje en la imagen/densidad de drenaje mapa varía según la imagen utilizada, el tipo de paisaje y según la escala de trabajo. Si comparamos la densidad de drenaje media obtenida en toda la zona de estudio en el mapa y en cada una de las imágenes (tabla 1) se observan importantes diferencias que constatan la necesidad de establecer una calibración. Existe una sobrestimación de la densidad de drenaje calculada a partir de imágenes SPOT y una infravaloración con la imagen Landsat.

Para calibrar la imagen será necesario utilizar al menos dos zonas patrón donde se calculará la relación densidad de drenaje imagen/densidad de drenaje terreno. Dichas zonas deberán cubrir el rango de densidades de drenaje existentes en el conjunto de la zona. Para un tamaño de celda dado se calcula la densidad de drenaje en la imagen y en el terreno y a partir de estos dos puntos se obtiene una rectar de regresión que se aplicará al conjunto de la imagen que deseamos calibrar. Obviamente, los resultados mejorarán si disponemos de más de dos zonas para el cálculo de la re-

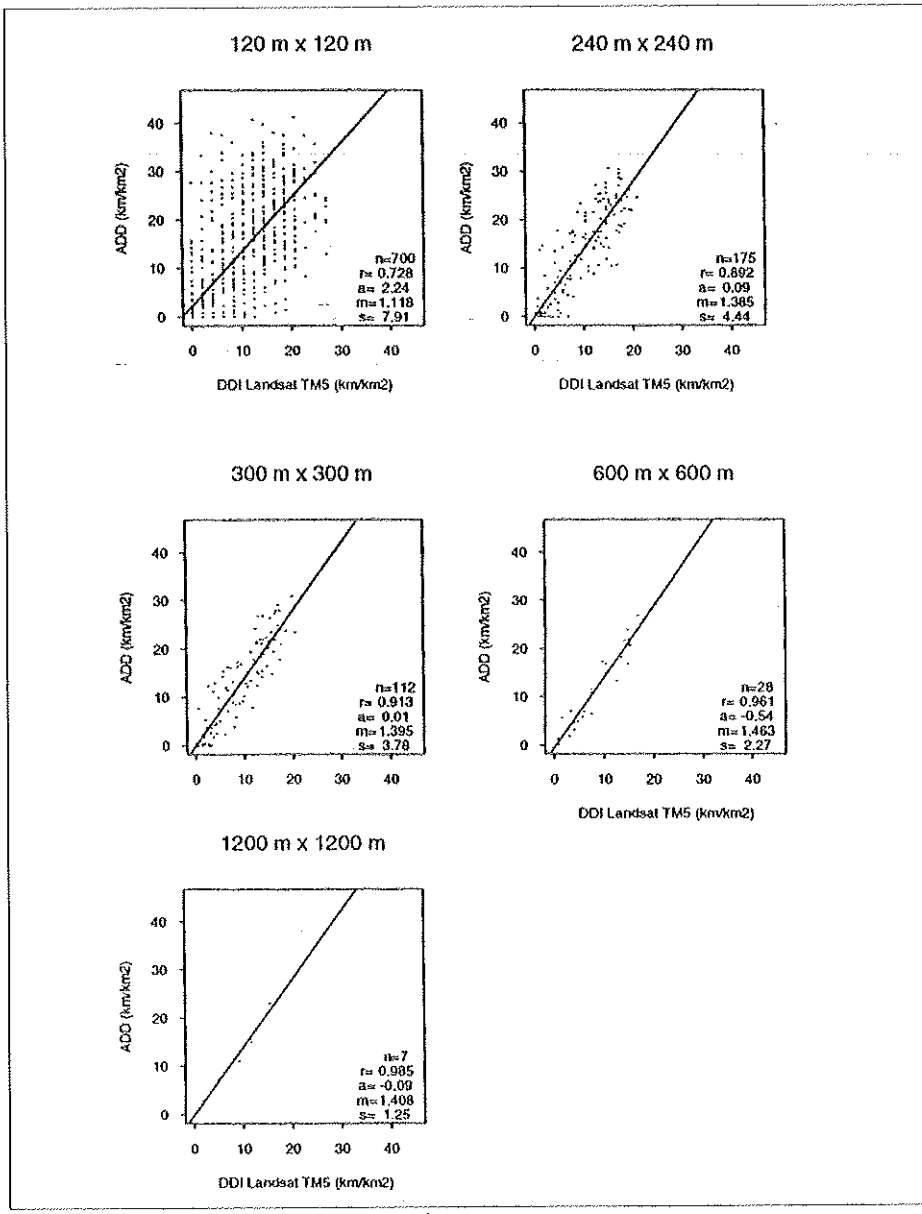

FIGURA 5

Ajustes lineales entre la densidad de drenaje «verdadera» (ADD) y la densidad de drenaje calculada a partir de la imagen (IDD) para la imagen Landsat- TM banda 5 del 14 de septiembre de 1987 de Albudeite (n: número de puntos, r: coeficiente de correlación, a: ordenada en el origen, m: pendiente de la recta, s: error estándar de estimación)

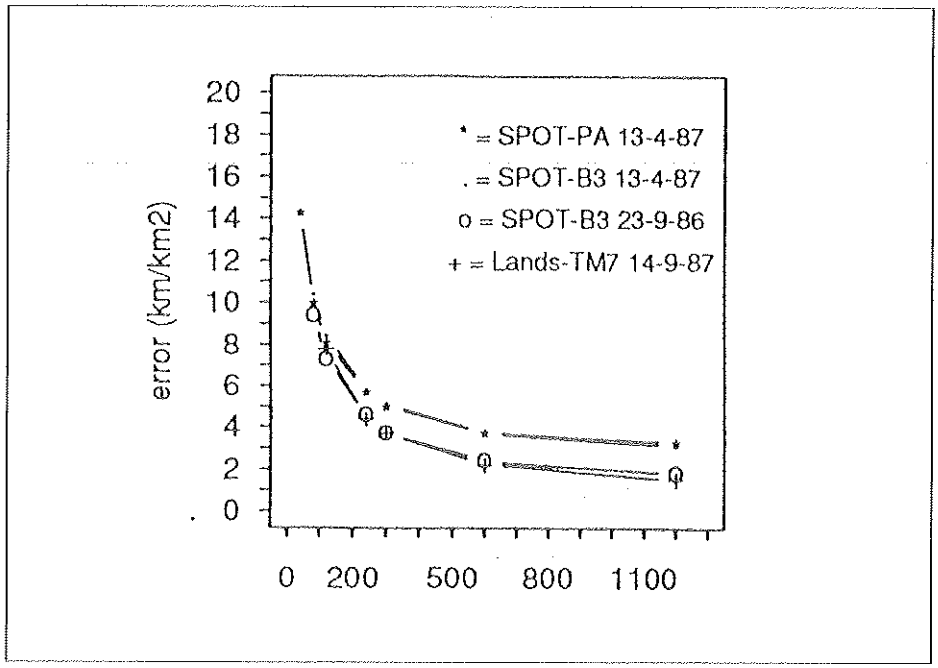

FIGURA 6
Error estándar de estimación obtenido en el análisis de regresión para cada imagen y para todos los tamaños de celda utilizados

lación. Utilizando este método de calibrado para un tamaño de celda de 600 m x 600 m se ha calculado la densidad de drenaje media para cada imagen. En la tabla 2 se muestran las diferencias medias obtenidas entre la densidad de drenaje «verdadera» y densidad de drenaje de la imagen una vez aplicada la calibración.

Zona de Belmonte

Para el estudio de la zona de Belmonte, solamente dispusimos de imágenes Landsat-5 TM. Este hecho no supuso inconveniente ya que los resultados obtenidos en Albudeite no sugieren mejores resultados con imágenes de mejor resolución espacial como las imágenes SPOT. Para el realce de la imagen y la determinación de la densidad de drenaje se aplicaron las mismas técnicas de tratamiento digital ya señaladas anteriormente. Sin embargo, en esta ocasión no se observó ninguna relación significativa entre los valores de densidad de drenaje calculados en la imagen y los valores de densidad de drenaje «verdaderos».

Las características particulares del terreno, con escaso relieve y dominado por un flujo subsuperficial hacen prácticamente imposible la detección de los canales a partir de las imágenes. Las líneas de drenaje no están definidas por canales y no existe

contenido en humedad suficiente para ser detectadas en las imágenes. Además, con frecuencia los cauces se encuentran totalmente recubiertos por terrenos de labor (cultivos de cereales en su mayoría) lo que los hace difíciles de identificar incluso sobre el terreno.

Si bien a partir del análisis efectuado no se han obtenido buenos resultados para este tipo de terreno, no descartamos la posibilidad de obtener mejores resultados utilizando imágenes de otras fechas e incrementando el nivel de tratamiento de las imágenes como por ejemplo, con la inclusión de información procedente de modelos de elevación del terreno.

Conclusiones

La densidad de drenaje es un parámetro importante e indispensable para el desarrollo de modelos de erosión, hidrológicos y ecológicos de gran escala. La determinación precisa de la densidad de drenaje a partir de imágenes de satélite proporcionaría una entrada de considerable valor en la modelización, especialmente si puede realizarse de una forma operativa. Los resultados obtenidos en este trabajo hasta la fecha nos permiten establecer las siguientes conclusiones:

i) El análisis efectuado en una zona de terreno muy diseccionado, con escasa cubierta vegetal y un predominio de flujo superficial muestra la existencia de una fuerte relación lineal entre los datos de la imagen y los valores obtenidos a partir de foto aérea. Se obtuvieron buenos resultados en todas las imágenes y fechas analizadas cuando utilizamos unidades espaciales mayores de 0,36 km^2 como base para el cálculo de la densidad de drenaje. Para unidades inferiores a 0,25 km^2 los errores aumentan rápidamente, aunque la densidad de drenaje puede obtenerse dentro de un margen de error aceptable para unidades de 0,06 km^2. Sin embargo, no es posible determinar a priori un modelo de predicción de la densidad de drenaje. Los datos de verdad-terreno son necesarios para determinar la rela-ción entre los datos de la imagen y los valores absolutos de la densidad de drenaje.

ii) El ángulo solar es el principal factor determinante de la bondad del ajus-te en zonas montañosas. Las sombras acentúan el efecto del relieve y fa-cilitan la identificación de las líneas de drenaje en las imágenes.

iii) De todas las técnicas de tratamiento digital de imágenes utilizadas, el filtro laplaciano para la extracción de bordes parece ser el mejor tratamiento para la extracción del drenaje. Los mejores resultados se obtuvieron con imágenes SPOT-MSS y Landsat-5 TM (bandas 7 y 5). La mejor resolu-

Mapa	SPOT-PA 13-4-87	SPOT-MSS 13-4-87	SPOT-MSS 23-9-86	Landsat 14-9-87
11,2	22,5	13,5	13,7	8,1

TABLA 1
Valores medio sde densidad de drenaje (Km - 1)
para la zona de albudeite (10,08 Km 2)

SPOT-PA 13-4-87	SPOT-MSS 13-4-87	SPOT-MSS 23-9-86	Landsat 14-9-87
-2,59	0,77	-1,57	0,34

TABLA 2
Diferencia media entre densidad de drenaje calculada y densidad
de drenaje verdadera en albudeite

ción espacial de los datos SPOT pancromático no parece ser un factor importante.

iv) En terrenos con escasa escorrentía superficial y un desarrollo pobre de los canales de drenaje no se obtuvo relación entre los datos de la imagen y la densidad de drenaje obtenida por fotointerpretación de fotos aéreas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el Departamento de Geografía de la Universidad de Bristol (U.K.) mediante el disfrute de una beca postdoctoral del Programa Fleming (British Council-Ministerio de Educación y Ciencia). Agradecemos a dichas instituciones su colaboración. Damos las gracias al Dr. A. Hanison (Universidad de Bristol) por proporcionarnos algunos de los programas utilizados en este estudio y al Departamento de Te modinamica de la Universitat de Valencia por el préstamo de la imagen Landsat TM de Albudeite. Este trabajo se inscribe en el marco del proyecto DGICYT PB89-0526.

Bibliografía

Astaras, T.: 1985. Drainage network analysis of LANDSAT images of the Olympus-Pieria mountain area, northern Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 6 (5), 673-686.

Astaras, T., Lambrinos, N. and Soulakellis, N.: 1990. A drainage system analysis evaluation of, and comparison between, Landsat-3 RVB, Landsat-5 TM and SPOT PA imageries covering the Central Macedonia district, Greece, *International Journal of Remote Sensing* 11 (9) 1549-1559.

Calver, A., Kirkby, M.J. and Weyman, D.R.: 1972. Modelling hillslope and channel flows. In: Chorley, R.J. (ed.) *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen, London, 197-218.
Carlston, C.W.: 1963. Drainage density and stream flow. *U S. Geological Survey, Professional Paper*, 422-C.
Chidley, T.R.E. and Drayton, R.S.: 1986a. Visual interpretation of standard satellite images for the design of water resources schemes, *Hydrologic Applications of Space Technology* (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August 1985), IAHS Puól. no. 160, 249-256.
Chidley, T.R.E. and Drayton, R.S.: 1986b. The use of SPOT-simulated imagery in hydrological mapping, *International Journal of Remote Sensing*, 7 (6),791-799.
Gardner, T.W., Connors, K.F. and Hu,H.: 1989. Extraction of fluvial networks from SPOT panchromatic data in a low relief, arid basin, *International Journal of Remote Sensing*, 10 (11), 1789-1801.
Gregory, K.J. and Walling, D.E.: 1968. The variation of drainage density within a catchment, *Bulletin International Associahon of Scientific Hidrology* 13 (2), 61-68.
Killpack, D.P. and McCoy, R.M.: 1981. An application of Landsat derived data to a regional hydrologic model, *Remote Sensing Quarterly*, 3 (2), 27-33.
Kirkby, M.J.: 1980. The stream head as a significant geomorphic threshold., In: Coates, D.R. and Vitek, J.D. (eds.), *Threshold in Geomorphology*, Allen and Unwin, London, 53-75.
Parry, J.T. and Turner, H.: 1971. Infrared Photos for Drainage Analysis, *Photogrammetric Engineering*, 37, 1031- 1038.
Rango, A., Foster, J. and Salomonson, V.V. 1975. Extraction and utilization of space acquired physiographic data for water resources development, *Water Resources Bulletin*, 11 (6), 1245-1255.
Willgoose, G, Bras. R.L. and Rodríguez-Iturbe, I. 1991. Results from a new model of liver basin evolution, *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 237-254.