



## IMPACTO DEL ALGORITMO $D^\infty$ EN LA EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAJE A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

*Impact of the  $D^\infty$  algorithm on the automatic extraction of drainage networks from Digital Elevation Models*

I.C. Maestro Cano

C/ Sollana, 24, 44<sup>a</sup> 46013-VALENCIA

E-mail: igmaeca@doctor.upv.es

Tel.: 680 171 443

**Resumen:** En los últimos años se ha dedicado un considerable esfuerzo a la mejora de la extracción de redes de drenaje a partir de Modelos Digitales de Elevaciones. Se ha sugerido que algoritmos de cálculo del área de acumulación más precisos ayudarían notablemente a resolver este problema. Este trabajo evalúa el beneficio real de este planteamiento. Para ello se ha elegido el algoritmo de más impacto en los últimos años (el  $D^\infty$ ) y ha sido comparado con el más empleado hasta ahora (el D8). Se ha definido una zona de estudio y se han seleccionado las técnicas estadísticas que describían mejor las diferencias y similitudes entre ambos métodos. Los resultados parecen confirmar la hipótesis de que el impacto real que los métodos multi-flujo, como el  $D^\infty$ , tienen sobre la extracción de redes más realistas es relativamente bajo, lo cual podría indicar futuras líneas de investigación.

**Palabras clave:** redes de drenaje, área de acumulación, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), hidrología, erosión fluvial, formación de cauces.

**Abstract:** In the last years, a substantial effort has been dedicated to enhance the drainage network extraction from Digital Elevation Models. The direction of this enhancement has been varied. It has been suggested that more precise algorithms to compute the contributing area could help substantially to solve this problem. The current work proposes to assess the real benefit that this approach would have on the finally extracted network. For it, the algorithm with greatest impact in the last years has been chosen, which seems to offer more expectations in this sense ( $D^\infty$ ), and has been compared with the most used one up to now (D8). To this purpose a study zone has been defined, composed of two contiguous basins, and the statistical techniques that was considered described better so much the differences as the similarities between both methods have been selected. Our results seems to confirm the hypothesis that the real impact that multi-flow methods, as  $D^\infty$ , have on realist networks extraction is fairly poor, which maybe it is showing the way for future lines of research.

**Keywords:** drainage networks, contributing area, Digital Elevation Model (DEM), hydrology, fluvial erosion, channel initiation.



Maestro, I.C. (2004). Impacto del algoritmo  $D^\infty$  en la extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. *Rev. C. & G.*, 19 (1-2), 23-33.

### 1. Introducción

Uno de los grandes caballos de batalla en geomorfología fluvial es el establecimiento de un criterio lo suficientemente nítido que defina qué es y

que no es un cauce. La cuestión es realmente compleja y, de hecho, podría decirse que existen tantas definiciones de cauce como hidrólogos. No resultan extrañas pues las palabras de Band (1993) cuando afirmaba que “cualquier definición de una red de

*cauces finita resulta arbitraria y completamente dependiente de la escala*". Sin embargo, desde que Montgomery y Dietrich (1988) propusieran que "los cauces comienzan en el primer punto ladera abajo desde la divisoria para el cual existe un área suficiente para mantener un cauce", parece ampliamente aceptado el empleo de un valor umbral de acumulación de flujo como parámetro que definirá el punto de inicio de un cauce.

Por tanto, a la hora de delinear la red de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones (MDE), que es la problemática en la que se centrará el presente trabajo, un paso necesario es el cálculo del área de acumulación en cada celda para, a partir de un determinado valor mínimo (umbral de acumulación), comenzar a delinear la red de cauces. Por área de acumulación de un punto se entiende la superficie de la cuenca existente ladera arriba y que vierte al punto considerado (en este caso el área de acumulación será la cantidad de celdas del modelo que viertan sobre la celda considerada).

En la actualidad, son varios los algoritmos existentes para realizar este cálculo, lo que lleva a pensar que la extracción de la red de drenaje posee distintos planteamientos, tantos como algoritmos de cálculo puedan emplearse. En consecuencia, una de las formas de mejorar la extracción de redes de drenaje apuntaría, a priori, hacia una más precisa determinación del área de acumulación. De hecho, los actuales algoritmos poseen una serie de deficiencias, presentadas en el siguiente apartado, que en los últimos años se está tratando de eliminar.

## 2. Estado del arte en la determinación del área de acumulación

Como se ha dicho, son varios los métodos que existen en la actualidad para el cálculo del área de acumulación. En todos ellos, a partir de la dirección del flujo, el algoritmo va acumulando la cantidad de celdas que vierten a cada una y, con esto, estimando la superficie vertiente. Estos métodos se estructuran fundamentalmente entorno a dos grandes grupos: los modelos de flujo simple, en los que el flujo es dirigido en una única dirección, y los de flujo múltiple, que

tienen en cuenta la dispersión del flujo que puede producirse sobre determinadas formas del relieve. A continuación se describen, de forma somera, los algoritmos desarrollados hasta el momento.

- A. D8 (determinista de 8 soluciones) de O'Callaghan y Mark (1984). Constituye el método más empleado en la actualidad. Posee dos importantes limitaciones, la primera es que el flujo sólo puede ser dirigido en una de las ocho direcciones principales en torno a cada celda (la de mayor pendiente). De este modo se introduce un sesgo en las direcciones de la red de drenaje derivado de la fuerte "discretización"<sup>1</sup> que se produce en la información disponible. La segunda limitación consiste en que es incapaz de tener en cuenta la dispersión existente en el flujo. Son evidentes las consecuencias negativas de ambas limitaciones, entre las cuales ha de destacarse el hecho de que supone una concentración irreal (excesiva) del flujo, induciendo una estimación del área de acumulación siempre por exceso.
- 8 (aleatorio de 8 soluciones) de Fairfield y Leymarie (1991). Este método es una versión estocástica del D8 que aparenta ser más realista pero que continua sin modelar la dispersión del flujo. La letra (de *random*, aleatorio) hace referencia al hecho de que el flujo es dirigido de forma aleatoria en función de una probabilidad que es calculada a partir de la pendiente.
- C. A partir de los dos métodos anteriores se elaboraron sendas versiones multi-flujo: el FD8 (Quinn *et al.*, 1991) y el F 8 (Freeman, 1991). Estos métodos calculan la dirección del flujo según los métodos D8 y 8, respectivamente, pero permitiendo ahora el reparto del flujo entre las celdas existentes aguas arriba de forma proporcional a la pendiente existente.
- D. DEMON (Digital Elevation Model Networks) de Costa-Cabral y Burges (1994). Este método, basado en uno anteriormente propuesto por Lea (1992), interpreta el flujo en función de la dirección que tome el plano generado por

<sup>1</sup> Se emplea esta palabra, que la Real Academia Española no reconoce, por considerar que describe a la perfección el hecho de que se pase de un conjunto continuo, con infinitas direcciones entre 0 y 360°, a otro finito (discreto), con sólo 8 elementos (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315).

cuatro celdas contiguas o, lo que es lo mismo, en función de una orientación que se asocia a cada celda. En este caso, se simula el grado de concentración del flujo (y, por tanto, su dispersión) asignándole un valor de anchura que aumenta sobre relieves divergentes y disminuye en aquellos que son convergentes, resultando un flujo denominado “tubular”.

- E. D de Tarboton (1997). Este método, cuyo examen se propone este trabajo, calcula la pendiente de cada celda con respecto a sus vecinas tomando como referencia aquella que genera la máxima pendiente. La principal novedad reside en que, posteriormente, reparte el flujo entre todas las celdas existentes aguas abajo. Este reparto se realiza teniendo en cuenta el grado de proximidad existente entre la pendiente resultante en cada caso y la máxima tomada como referencia. Su nombre hace referencia al hecho de que, de este modo, el flujo pasa a ser dirigido en cualquiera de las infinitas direcciones existentes entre  $0$  y  $360^{\circ}$ . Hasta ahora es, junto con el DEMON, uno de los métodos más aproximados dado que resuelve los dos grandes problemas que poseen otros métodos (el sesgo en las direcciones del flujo y el modelado de la dispersión en el flujo).

Como puede verse, las propuestas para la extracción automática de redes de drenaje son muy variadas y no parecen existir fórmulas magistrales que eviten todas las posibles deficiencias que puedan surgir.

### 3. Objetivos

Se pretenden calibrar las consecuencias prácticas que el empleo de los algoritmos multi-flujo tienen sobre la mejora y depuración de la extracción automática de una red de drenaje a partir de un modelo digital de elevaciones. Se trata de evaluar si las ventajas de este tipo de algoritmos tendrían la entidad suficiente como para llevar al abandono del clásico método D8 limitándose, y debe insistirse en

ello, al problema de la extracción automática de redes de drenaje. Para ello se parte de la hipótesis, ya esbozada en la introducción, de que una más precisa determinación del área de acumulación en cada celda, supondría la delineación más correcta de los distintos cauces que componen la red de drenaje a extraer.

Para alcanzar este objetivo, se plantea la comparativa entre los resultados que se obtendrían mediante el empleo, por una parte, del algoritmo multi-flujo más novedoso y ampliamente reconocido, el denominado  $D_{\infty}$  (Tarboton, 1997) y, por otra, del habitual hasta ahora, conocido como D8 (O’Callaghan y Mark, 1984).

En principio, son conocidas las desventajas que el método D8 presenta frente al  $D_{\infty}$  (véase el apartado anterior). No obstante, consideramos que esto no implica de forma necesaria que su empleo sea recomendable siempre. Ya Tarboton, al presentar su nuevo algoritmo, dejaba claro que el método D8 continuaría siendo la opción favorita a la hora de extraer redes de drenaje debido a que “no podemos trabajar (*todavía* no hemos aprendido a ello) con redes que se bifurcan en dirección aguas abajo”<sup>2</sup>. El planteamiento que propone este trabajo es el de averiguar si, como se desprende de las palabras de Tarboton, partiendo de la hipótesis de que este obstáculo se salvara (y, *finalmente*, conociéramos la forma de trabajar con estos flujos divergentes), el empleo del método  $D_{\infty}$  supondría una mejora significativa en la red de drenaje extraída.

Esta cuestión, que consideramos goza de un razonable interés, tiene su origen en el hecho de que en el caso de la extracción de redes de drenaje, al estar centrando nuestra atención sobre los cauces, en los cuales el flujo es concentrado, ya se está desestimando la influencia sobre aquellas otras zonas en las que el flujo es difuso (laderas) donde, a priori, la mejora que proporcionaría el método  $D_{\infty}$  sería realmente apreciable.

### 4. Materiales y metodología

La zona elegida para esta comparativa tiene una extensión aproximada de  $165 \text{ km}^2$  y consta de dos

<sup>2</sup> Tarboton, D. (2001) *Terrain analysis using Digital Elevation Models* [<http://moose.cce.usu.edu/taudem1/taudem.html>]. Nota: La cursiva ha sido añadida por el autor.

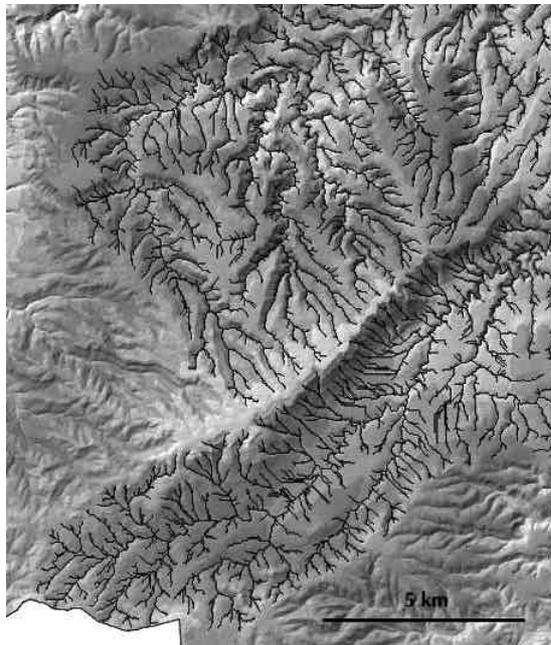


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.  
Figure 1. Map of the analyzed zone.

cuenca contiguas, una perteneciente a la rambla de la Molinera y otra a la rambla de las Chofleras, ambas incluidas en la cuenca del río Júcar y situadas en el interior de la provincia de Valencia, dentro del que es conocido como macizo del Caroig (Fig. 1).

La información de la que se dispuso fue la almacenada en un modelo digital de elevaciones con una resolución de diez metros elaborado a partir de la cartografía 1:10.000 en formato digital del Instituto Cartográfico Valenciano, utilizándose para ello el programa ArcView<sup>®</sup> de Environmental Systems Research Institute (ESRI). Para su generación se realizó una verificación de la información, especialmente de aquella correspondiente a las líneas de rotura y, posteriormente, se efectuó una revisión visual (mediante el empleo de un filtro de suavizado) de los posibles errores que el modelo resultante pudiera tener. Para consultar alguna de las metodologías existentes para la corrección automatizada de modelos digitales del terreno, pueden consultarse trabajos como el de Saura *et al.* (2000), basado también en el empleo de filtros de suavizado.

El procedimiento definido para realizar el estudio que nos ocupa ha sido el de realizar el cál-

culo del modelo de acumulación correspondiente al MDE según los algoritmos D8 y D para posteriormente comparar los valores obtenidos, tanto dentro de las propias cuencas como a lo largo de las redes que las vertebran. Para ello se efectuó la extracción de la red de drenaje según el procedimiento habitual propuesto por diversos autores (Montgomery y Dietrich, 1988; Tarboton *et al.*, 1991) y ya descrito en trabajos anteriores (Maestro *et al.*, 2003), tomando como umbral de acumulación un valor de 150 celdas (15.000 m<sup>2</sup>). Esta red se empleó como punto de partida para la generación de una muestra aleatoria de observables sobre los cuales realizar el estudio estadístico que nos permita conseguir el objetivo propuesto. Esta muestra se consiguió tomando un punto de observación cada 100 metros a lo largo de la red extraída mediante el empleo del algoritmo D8 (Fig. 5), así como todos aquellos puntos de la misma que constituyen, ya sea la cabecera, ya sea un punto de confluencia. De este modo, la muestra de trabajo la componían 7.898 individuos (puntos observables).

Para el cálculo del modelo de acumulaciones mediante ambos algoritmos, D8 y D, se utilizó el programa TARDEM que el profesor David Tarboton, de la Utah State University, pone a disposición en la dirección de Internet <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/tardem.html>. Con respecto al coste computacional de ambos algoritmos, contando las dos fases de que consta el cálculo (cálculo de las direcciones del flujo y del área de acumulación), en el caso del D8 el tiempo empleado fue de unos 15 segundos, frente a los 23 segundos que empleó el algoritmo D (esto es, el coste computacional del algoritmo D supera en cerca del 50% al correspondiente al algoritmo D8).

Una vez obtenidos los modelos a comparar, se extrajeron los valores correspondientes a los puntos de la muestra y se realizaron los oportunos análisis estadísticos que nos permitieran evaluar el grado de discrepancia existente entre ambos modelos, así como determinar las causas de dichas discrepancias. En este sentido, se evaluó en qué casos la diferencia existente podía deberse a una mejora real o, por el contrario, a simples deficiencias en la metodología escogida para llevar a cabo el contraste. Los resultados de esta serie de análisis son los que se describen en el siguiente apartado.

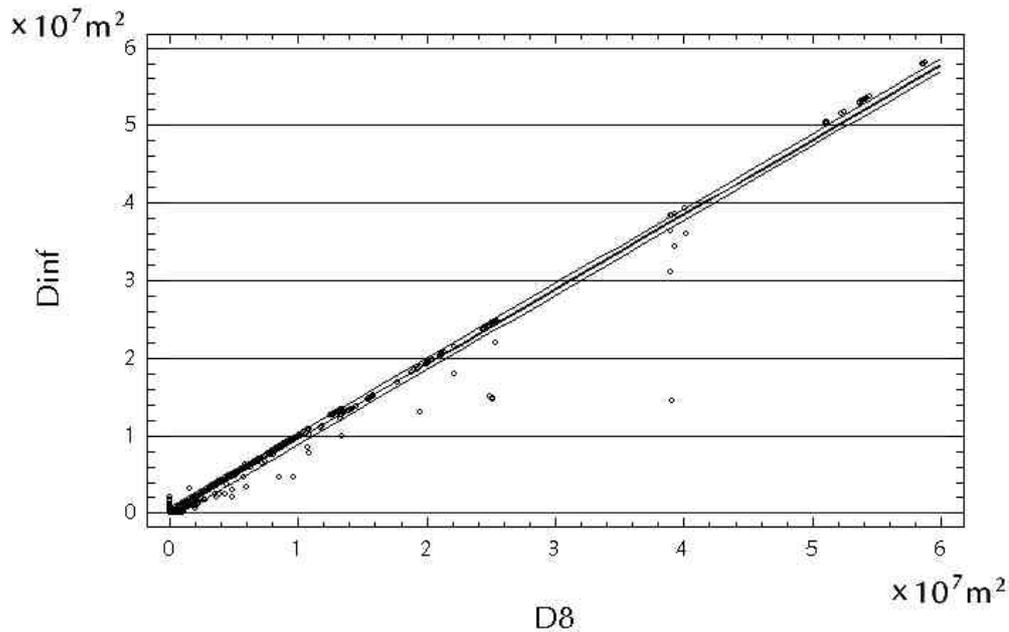


Figura 2. Diagrama de dispersión de valores de área de acumulación según los métodos D8 y  $D^\infty$ .  
 Figure 2. Scatterogram of contributing area from algorithms D8 and  $D^\infty$ .

## 5. Resultados

La primera operación que se llevó a cabo para contrastar los resultados obtenidos fue mostrarlos en un diagrama de dispersión que enfrentara ambas metodologías. Esta es claramente la forma más directa de percibir discrepancias entre los métodos analizados (Fig. 2).

Como se desprende de la figura 2, en líneas generales, existe una más que clara coincidencia entre ambos modelos (lo que evidencia el ajuste lineal mostrado en azul). Los puntos en los que se observa una discrepancia anormalmente elevada muestran no una condición real sino un artefacto de la metodología empleada, que combina elementos de tipo vectorial (la red de drenaje que define los puntos de muestreo) con otros de tipo ráster (el modelo de acumulación). En efecto, existen unos pocos casos en los que el punto tomado para la muestra (elegido según el criterio ya descrito de tomar un intervalo de 100 metros) queda situado no en la celda que le correspondería según la trayectoria definida por el modelo

ráster de acumulaciones sino en una vecina, lo cual genera un error grosero que, por tanto, resulta detectable (Fig.4). Ello explicaría también el hecho de que todos estos errores se produzcan únicamente en un sentido, quedando siempre por debajo de la recta ajustada (Fig. 2) al estar comparando el valor de una celda correspondiente a un cauce (según el método D8) con una celda vecina en el modelo  $D^\infty$ , que corresponde a ladera y, por tanto, posee un valor de área de acumulación inferior. También explicaría el hecho (Fig. 3) de que no sea mayor el número de puntos en los que la discrepancia es baja (que, si se toma como referencia una discrepancia del 5%, no supera el 40%).

Todo lo anterior ocasiona que la comparación en algunas celdas se realice tomando valores incorrectos si bien, como se verá, una vez conocido el fenómeno en cuestión, apenas tiene impacto sobre las conclusiones (entre otras razones porque la discrepancia suele alcanzar valores realmente absurdos, que difícilmente podrían ser interpretados como algo derivado de las distintas metodologías comparadas)<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Inicialmente se pensó en la posibilidad de emplear una estrategia diferente en la selección de puntos muestrales, si bien, una minuciosa revisión de la muestra confirmó lo superfluo de tal iniciativa.

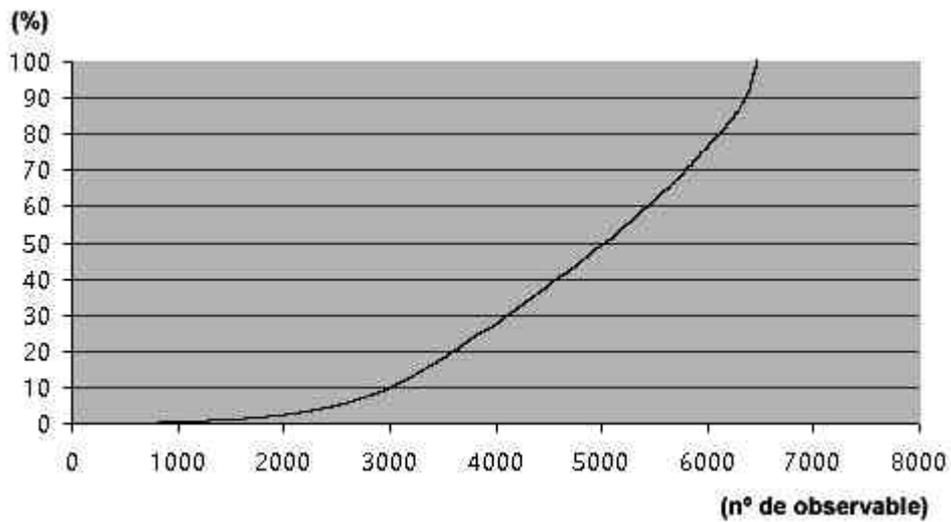


Figura 3. Gráfica de observables (eje x) y discrepancias (en porcentaje) entre los métodos D8 y D $\infty$  (eje y).  
 Figure 3. Diagram of sample points (x axis) and discrepancies (in percentage) between methods D8 and D $\infty$  (y axis).



Figura 4. Extracto de la zona de estudio. El trazado en color negro señala la trayectoria de la red según el modelo D8 frente a la del modelo D $\infty$ , las celdas en azul oscuro que discurren próximas al anterior. Los círculos en color rojo destacan las celdas en las que no se produce la coincidencia que requiere una estricta comparación.

Figure 4. Excerpt from the working area. Black lines are the network extracted by means of D8 algorithm while D $\infty$ , in dark blue, runs near the previous. The red circles remark pixels where the needed coincidence to attain a precise comparison is not achieved.

Aclarado este aspecto que pudiera llamar la atención, veamos cuales han sido los valores del ajuste por mínimos cuadrados entre ambos modelos, el D8 y el D $\infty$  (tabla 1).

Recta de regresión ajustada  $D\infty = 0,9634 D8 + 24,0882$   
 Coeficiente de correlación,  $r = 0,9957$   
 Coeficiente de determinación,  $r^2 (\%) = 99,1497$   
 Desviación típica (en celdas) 3855,35 Valor medio

Tabla 1. Datos del ajuste entre los modelos D8 y  $D_{\infty}$ .  
 Table 1. Data of the adjustment between D8 and  $D_{\infty}$  models.

Recta de regresión ajustada	$D_{\infty} = 0,9634 D8 - 24,0882$
Coefficiente de correlación, r	0,9957
Coefficiente de determinación, $r^2$ (%)	99,1497
Desviación típica (en celdas)	3855,35
Valor medio de los residuos obtenidos en el ajuste (en celdas)	534,721

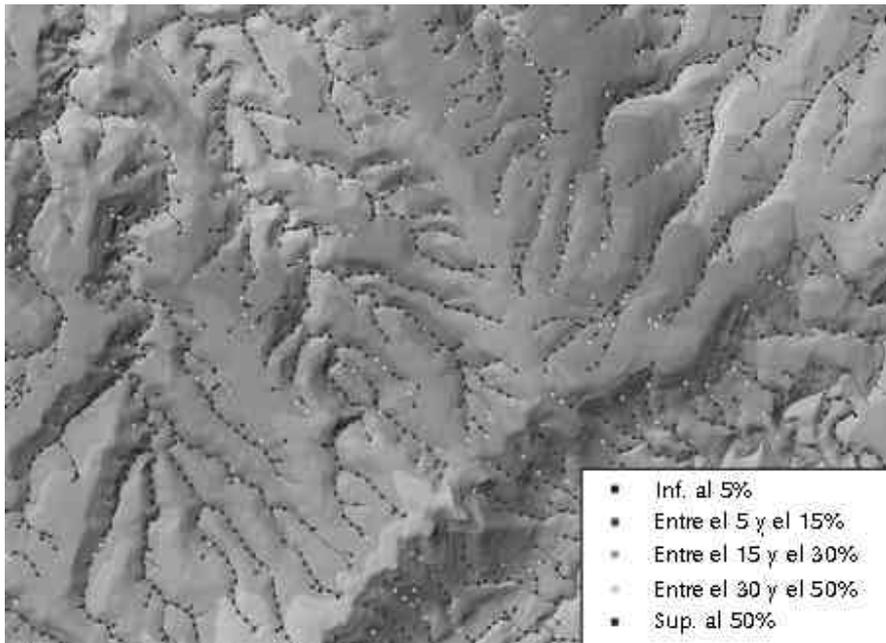


Figura 5. Extracto de la red y puntos de muestreo con sus valores de discrepancia, en porcentaje, codificados según la leyenda de colores incluida.

Figure 5. Excerpt from the network and sampling points with its discrepancies values, in percentage, coded as the colors legend explains.

de los residuos obtenidos en el ajuste (en celdas) 534,721

Del valor de la pendiente de la recta ajustada, muy próximo a uno, se deduce que, en efecto, tanto los valores obtenidos por el método D8 como por el  $D_{\infty}$  son casi idénticos desde una perspectiva global. También de forma global, la desviación típica existente en los valores de discrepancia está entorno a las 3.900 celdas, si bien observando la discrepancia en las proximidades de la intersección con el eje  $y$ , esta discrepancia

baja hasta un valor de tan sólo 24 celdas. Evidentemente, lo que esto nos estaría indicando es que las discrepancias son realmente bajas si se consideran en valor relativo, que es como parece lógico interpretarlas (por ejemplo, como porcentaje de discrepancia en la estimación –Fig. 5)<sup>4</sup>. Por otra parte, es conocida la propiedad del relieve de favorecer la convergencia del flujo superficial<sup>5</sup> lo que se traduce, salvo errores groseros, en una menor diferencia entre los modelo D8 y  $D_{\infty}$  según se avanza aguas abajo.

<sup>4</sup> Para obtener estos valores de discrepancia relativa se ha tomado como valor total de la observación el correspondiente al método D8 (tomar el método  $D_{\infty}$  apenas introduce cambio alguno).

<sup>5</sup> Diversas experiencias en campo (Dunne y Aubry, 1986) han mostrado la inestabilidad que caracteriza al flujo laminar y que da lugar a que éste se disgregue con facilidad formando corrientes de agua que excavan cauces y terminan por integrarse en la red de drenaje.

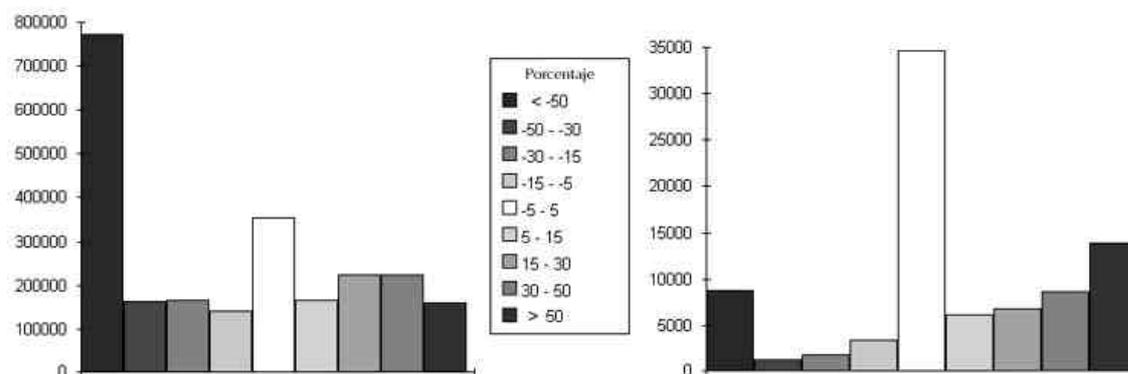


Figura 6. Histogramas de discrepancia, en porcentaje, correspondientes a la cuenca (izquierda) y a la red de drenaje (derecha). En el caso de la red es más evidente el predominio de valores bajos (inferiores al 5%).

Figure 6. Discrepancies histograms, in percentage, of basin (left) and drainage network (right). In the network histogram the predominance of the lowest values is clearer (lower than 5%).

Otra información de gran valor y que permitirá extraer conclusiones robustas es la comparación entre las distribuciones de discrepancia existentes en el caso de la red y de la cuenca entera.

En el caso de la cuenca (Fig. 6, izquierda), la distribución muestra un apuntamiento muy leve, con un coeficiente de curtosis de  $-3,4$  (distribución platicúrtica), indicando que las discrepancias bajas no destacan de forma especial sobre el resto. Por el contrario, si observamos la distribución limitada a los valores de la red de cauces (Fig. 6, derecha), ésta pasa a ser claramente leptocúrtica, con un coeficiente de curtosis de  $11,3$ , revelando un claro predominio de las discrepancias bajas (que llegan a constituir cerca del 40% del total de los datos) y, por tanto, una fuerte semejanza entre el modelo D8 y el D<sub>8</sub>. Esto constituiría un primer síntoma de que la tesis que se propone en este trabajo sería correcta (bajo impacto del algoritmo D<sub>8</sub> sobre las redes de drenaje).

En otro orden de ideas, destaca la asimetría existente en ambas distribuciones. Tanto en el caso de la cuenca como en el de la red, y desde una perspectiva global, se percibe un incremento en la frecuencia de las discrepancias positivas con respecto a las negativas (asimetría negativa). Esto equivale a decir que existe una mayor probabilidad de obtener valores de área superiores mediante el empleo

del método D8. Todo esto, que se percibe a simple vista, estadísticamente resulta como sigue: en el caso de la cuenca el coeficiente de asimetría de Fisher toma un valor de  $1,03$  (asimetría positiva), frente al valor de  $-0,69$  (asimetría negativa, pero algo menor) que posee la red.

La asimetría existente en el caso de la red, probablemente sea debida al efecto excesivamente acumulador del flujo que caracteriza al algoritmo D8 (que no es multi-flujo), y que origina que exista un mayor número de celdas a lo largo de la red de cauces cuya área de acumulación según el algoritmo D8 resulta superior a la estimada mediante el algoritmo D<sub>8</sub><sup>6</sup>. En cuanto a la asimetría positiva observable en el caso de la cuenca vendría explicada por el hecho de que, si bien desde el punto de vista global la asimetría es también negativa (Fig. 6), localmente (en concreto para los valores de discrepancia superiores al 50%) existe una fuerte asimetría positiva que oculta la tendencia general de los datos en un sentido contrario. Es el efecto dispersivo del flujo que caracteriza al algoritmo D<sub>8</sub> (que es multi-flujo) el que ocasiona que, al repartir más el flujo de agua a lo largo de la cuenca (Fig. 7), se genere una mayor cantidad de celdas cuya área de acumulación resulta superior a la obtenida mediante el algoritmo D8<sup>7</sup> (que, por el contrario, al ser de flujo simple, limita el número

<sup>6</sup> Este fenómeno así lo confirma la distribución de puntos existente entorno a la recta de regresión (Fig. 2).

<sup>7</sup> Este fenómeno lo confirma la simple comparación de los histogramas de frecuencias de los modelos ráster según ambos métodos.

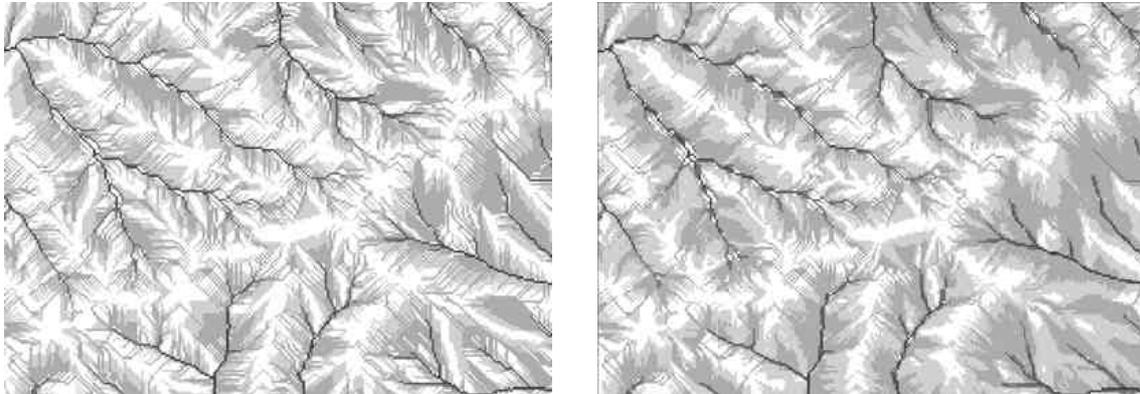


Figura 7. Extracto del modelo de acumulaciones de la cuenca analizada según los métodos D8 (izquierda) y  $D^\infty$  (derecha). Obsérvese el evidente carácter concentrador del modelo D8, más lineal que el  $D^\infty$ .

Figure 7. Excerpt from contributing area model of the analyzed basin by using D8 (left) and  $D^\infty$  method (right). Note the clear concentrating nature of D8 model, more linear than  $D^\infty$ .

de celdas con área de acumulación alta). De esta forma, hay mayor número de celdas cuya discrepancia ( $D8-D^\infty$ ) cuando es elevada, resulta negativa. Por ello, este efecto es particularmente notable en las zonas de cabecera y ladera en las que, debido al escaso valor de área tratada, es fácil alcanzar valores de discrepancia muy por encima del 50% (Fig. 8, izquierda).

En cuanto a los “picos” que se aprecian en las colas de la distribución, tanto en el caso de la cuenca como del a red, son debidos a los errores groseros que se han descrito al principio de esta apartado.

Para confirmar las interpretaciones hasta aquí presentadas, se optó por realizar un ajuste separado de los datos correspondientes a las zonas de cabecera por una parte (tomando para ello sólo

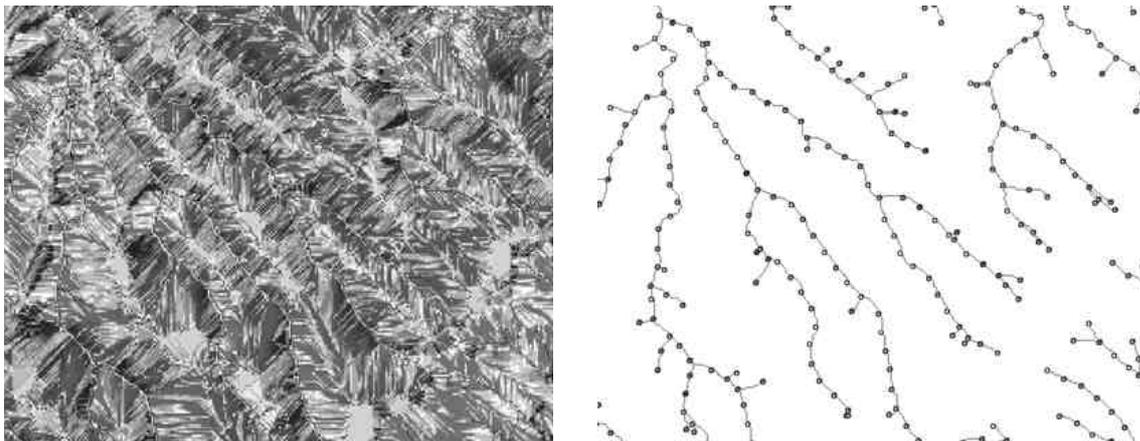


Figura 8. Extracto de la red analizada. A la izquierda la distribución de discrepancias considerando la cuenca en toda su extensión y a la derecha restringiéndose a la red de cauces (el valor de la discrepancia viene representado por la tonalidad del color, rojo si ésta es positiva y azul si negativa). Obsérvese que, en el caso de la red, el predominio de valores en tono claro o color blanco es evidente, indicando la semejanza entre ambas metodologías.

Figure 8. Excerpt from the analyzed network. To the left, the discrepancies distribution taking into account the whole basin and, to the right, the distribution restricted to the channels network (discrepancies values are represented by means of shade of color, red if positive and blue if negative). Note that, in the network case, the predominance of clear shade colors or white is obvious, showing the strong similarity between both methods.

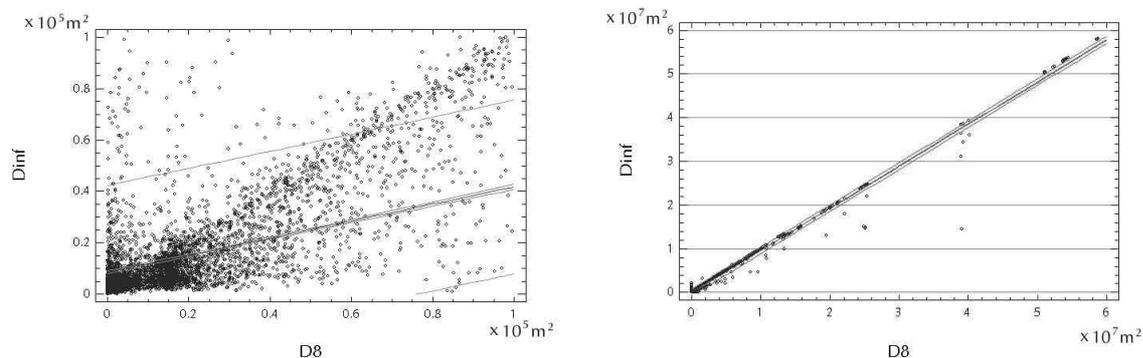


Figura 9. Ajuste por mínimos cuadrados de los valores de área según los métodos D8 y  $D^\infty$ . A la izquierda restringido a los valores de área inferior a  $100.000 \text{ m}^2$  (a las zonas de cabecera) y a la derecha tomando el resto de valores (al resto de la cuenca).  
 Figure 9. Least squares adjustment of contributing area according to D8 and  $D^\infty$  methods. To the left, restricted to the values lower than  $100.000 \text{ m}^2$  (head channel zones) and, to the right, taking into account the rest of values (the rest of basin).

aqueños cuyo valor de área de acumulación fuera inferior a  $100.000 \text{ m}^2$ , y de los ubicados aguas abajo por otra (con un área superior a  $100.000 \text{ m}^2$ ). En el primer caso (Fig. 9, izquierda), se obtuvo la recta  $D^\infty = 85,5686 + 0,3319 D8$ , junto con un coeficiente de correlación de 0,61, mientras que en el segundo (Fig. 9, derecha), la recta obtenida venía definida por la ecuación  $D^\infty = 80,4299 + 0,963 D8$ , con un coeficiente de correlación de 0,9953 (caracterización muy similar a la correspondiente al ajuste global de los datos). Esto confirmaría que la diferencia en los resultados obtenidos mediante ambos métodos es notoria únicamente en las zonas de cabecera (con una pendiente de la recta de regresión  $-0,3319$ — muy alejada de la unidad), no apreciándose diferencias significativas cuando los cauces gestionan la escorrentía proveniente de áreas superiores a los  $100.000 \text{ m}^2$ .

## 6. Conclusiones

Se acepta de partida la evidente mejora que el método  $D^\infty$  supone en multitud aplicaciones, alguna de las cuales ya ha sido abordada, como es el caso del análisis de estabilidad de laderas (Pack *et al.*, 1998). En general, el método  $D^\infty$  muestra su evidente potencial en aplicaciones que tengan por objeto el análisis de flujos difusos, como los que se producen en las zonas de ladera o cabecera de los cauces (donde se produce la transición de flujo

difuso a concentrado) o de la interpretación de flujos de escorrentía trenzada (*braided*). Esto mismo sugiere que es sólo una pequeña porción de la cuenca cuya red se desea extraer, la que se beneficiaría del empleo del método  $D^\infty$ .

Consideramos que los resultados obtenidos se derivan del hecho de que el caso que aquí se expone (la extracción de redes de drenaje) obtiene ventaja del carácter “agrupador” del algoritmo D8 (Fig. 7), a pesar de que, desde una perspectiva más amplia, el algoritmo  $D^\infty$  resulta a todas luces más competente.

En este sentido, dos años antes de que Tarboton publicara los resultados obtenidos mediante su algoritmo  $D^\infty$ , Peckham (1995, p. 17) sugería que no existían motivos para preocuparse por el efecto que un método que no sea multi-flujo (esto es, el D8) pudiera tener sobre la extracción de redes de drenaje, salvo en los casos en que el modelo empleado fuera de baja resolución.

En consecuencia, y a tenor de los resultados obtenidos en este trabajo, el método  $D^\infty$  no muestra, *a priori*, una mejoría tan evidente en lo que a la extracción de redes de drenaje se refiere. No obstante, es más que probable que si, al empleo de este algoritmo se le añadiera una nueva estrategia de delineado de redes, los resultados que se obtendrían serían más destacables. Es precisamente esta línea de investigación la que sería realmente interesante abordar, con fines a lograr mejoras reales en lo que a extracción automática de redes se refiere.

Otro argumento que apoyaría la mencionada línea de investigación sería que, con la actual extra-

tegia, una vez se comienza el trazado de un cauce no se contempla la posibilidad de que éste desaparezca. Se fuerza una conectividad entre los cauces que no siempre se ajusta a la realidad (un caso extremo muy conocido sería el del *Forau d'Aigualluts* en la cordillera pirenaica).

Por último, no se descarta la posibilidad de llevar a cabo nuevos trabajos en los que se empleen métodos de muestreo diferentes u otros criterios de comparación. No obstante, consideramos que el objetivo de valorar la conveniencia del empleo del método  $D_{\infty}$  frente al más habitual  $D_8$  se ha alcanzado, aportando evidencias de que, como establecía nuestra hipótesis inicial, en la gran mayoría de casos en que sea necesaria la extracción de una red de drenaje bastará el empleo del método  $D_8$ .

## Referencias bibliográficas

- Band, L.E. (1993): Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data. En *Channel Network Hydrology* (K. Beven y M.J. Kirkby, ed.), 13-42.
- Costa-Cabral, M.C. & Burges, S.J. (1994): Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30 (6), 1681-1692.
- Dunne, T. & Aubry, B.F. (1986): Evaluations of Horton's theory of sheetwash and rill erosion on the basis of field experiments. En: *Hillslope processes* de A.D. Abrahams (Allen & Unwin, ed.), 31-53.
- Fairfield, J. & Leymarie, P. (1991): Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27 (5), 709-717.
- Freeman, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Computers & Geosciences*, 17 (3), 413-422.
- Lea, N.L. (1992): An aspect driven kinematic routing algorithm. En: *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, (A.J. Parsons & A.D. Abrahams, ed.). New York (Estados Unidos).
- Maestro Cano, I.C., Pardo Pascual, J.E. & Porres de la Haza, M.J. (2003): Mejoras en la extracción automática de redes de drenaje aplicando el modelo área-pendiente. *Actas IX Conferencia Iberoamericana de SIG. VII Congreso Nacional de la AESIG. II Reunión del GMC SIGT*. Cáceres (España).
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1988): Where do channels begin. *Nature*, 336, 232-234.
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 328-344.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. & Goodwin C.N. (1998): The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. *Actas 8º Congreso de la International Association of Engineering Geology*. Vancouver (Canadá).
- Peckham, S.D. (1995): *Self-similarity in the geometry and dynamics of large river basins*. En: River network extraction from large DEMs. Tesis doctoral, Universidad de Colorado, Colorado (Estados Unidos).
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O. (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models *Hydrologic Processes*, 5, 59-80.
- Saura, S., Gómez-Plaza, A. & Castillo, V.M. (2000): Extracción automatizada de la red de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 14 (3-4), 25-37.
- Tarboton, D.G. (1997): A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2), 309-319.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. & Rodríguez-Iturbe, I. (1991): On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrologic Processes*, 5, 81-100.

Recibido 12 de febrero 2004

Aceptado 18 de enero 2005