

EL ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LAS CUENCAS FLUVIALES APLICADO AL ESTUDIO HIDROGRÁFICO

José María Senciales González

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga

Resumen: Se ha utilizado una serie de aspectos cualitativos de las redes de drenaje con objeto de calibrarlos en su utilidad para ser aplicados en el análisis de la dinámica hídrica de una cuenca real. Para ello, se ha hecho uso del análisis de tipologías de redes, características de los cauces principales y características de los lechos fluviales, siendo necesarias previamente aclarar las definiciones de cauce y corriente principal.

Palabras clave: Dinámica fluvial, aspectos cualitativos de la red, tipología de redes, cauces y lechos.

Abstract: Qualitative characteristics of drainage nets were used in order to gauge its utility for studies of dynamic hydrology applied to real basins. Drainage patterns were analyzed and the characters of the main rivers and river-bed studied. It was necessary to previously re-define the concepts of «river» and «main river»

Key words: Fluvial dynamic, qualitative characters of drainage nets, drainage patterns, rivers and river-beds.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de drenaje son la manifestación de la escorrentía superficial concentrada y jerarquizada en cauces. Arroyada concentrada y jerarquización implican un proceso dinámico, dado que requieren el movimiento de las aguas y su concentración progresiva hacia colectores cuyas dimensiones son

proporcionadas al volumen de escorrentía generado. Pero este proceso dinámico nunca se manifiesta con una intensidad estable y depende de la forma como interactúan numerosos factores.

Por un lado, depende de una alimentación hídrica, sea a partir de surgencias o resurgencias kársticas, o ya a partir de precipitaciones en forma de lluvia o en forma de nieve y que intervienen con intensidades muy variables, especialmente en el ámbito mediterráneo. Y, por otro, depende de la respuesta del suelo a estas precipitaciones, pues las características edáficas intervienen en el volumen escurrido en función de la textura, estructura, permeabilidad y condiciones de humedad del suelo. Además de sus características intrínsecas, la respuesta del suelo está influida por las características fisiográficas: pendiente, longitud, posición, orientación y forma de la ladera, que intervienen en la velocidad y aceleración de la escorrentía. Y también por la cubierta vegetal, que en su clase (herbácea, arbustiva, arbórea) y densidad puede facilitar la infiltración y reducir la energía del impacto de las gotas de agua, o contribuir a concentrar la arroyada hacia áreas de menor densidad vegetal.

En el origen y desarrollo de la red intervienen las características del sustrato (litología y tectónica), posibilitando o dificultando la infiltración y el excavado, y condicionando el trazado y configuración que la red adquiere. También intervienen, cada vez en mayor medida, las modificaciones humanas. Así, el hombre puede modificar la alimentación del caudal de la red, aumentándolo a partir de la creación de pozos y sondeos, así como por retornos de regadíos; o reduciéndolo con la desviación del caudal (canalizaciones) y extracciones del mismo. Por otra parte, puede alterar la dinámica natural de la cuenca creando nuevos niveles de base (diques, presas, extracción de áridos) que modifican la energía del caudal y, con ello, la tendencia degradacional o agradacional aguas abajo y/o aguas arriba de las infraestructuras creadas.

Se configura así el diseño de una red fluvial a lo largo del tiempo. Una red fluvial que evoluciona en forma y número de cauces; una red fluvial cuyos elementos constituyentes pueden cuantificarse y clasificarse y, de esta forma, establecer entre ellos relaciones numéricas: es la base de la morfometría fluvial. Pero también puede clasificarse a través de sus caracteres cualitativos, tipológicos, tanto en función del modelo de red de drenaje, como en función de las tipologías de cauce, entre otros aspectos diferenciadores.

2. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

Desde finales del siglo XVIII ya existía inquietud por la cuantificación de las redes de drenaje: así, en 1801, Playfair enunció la ley de las «uniones de

los tributarios correspondientes»: «Cada río consiste en un tronco principal alimentado por una serie de ramas, cada uno de los cuales discurre por un valle proporcionado a su tamaño, y todas ellas juntas forman un sistema de valles conectados unos a otros y con un ajuste tan perfecto de sus declives que ninguno se une al valle principal a un nivel ni demasiado alto ni demasiado bajo; hecho que sería completamente improbable si cada uno de estos valles no fuese el producto del trabajo de excavación de los ríos que corren por él» (Strahler, 1964). En esta declaración que se conoce como «Ley de Playfair», con origen en las ideas de J. Hutton (1737-1828), se adelantaba ya la evidencia de un funcionamiento dinámico acorde a una cierta jerarquización, a partir de la proporcionalidad entre río, valle y declive.

A principios del siglo XX (1914), el alemán Gravelius elabora una propuesta de jerarquización de corrientes. Pero los estudios de morfometría fluvial son abordados por un mayor número de autores a partir de mediados de siglo. En 1945, Horton formula los primeros modelos cuantitativos para analizar comportamientos fluviales. Sus conclusiones son retomadas a la vez que se modifican los sistemas de análisis, sobre todo respecto a las leyes de bifurcación de la red de drenaje, por autores como Schumm (1956), Strahler (1964), Shreve (1967), Scheidegger (1968) y, posteriormente, tratado y ampliado por otros investigadores, de entre los que destacamos a: Morisawa (1968), Chorley (1969), Gregory & Walling (1973), Weyman (1975), Dury (1981), Knighton (1984), o, ya en España, autores como Sala (1981), López Bermúdez (1983) y Romero Díaz (1985), entre otros.

Como explica Strahler (1964), el término «*morfometría fluvial*» se refiere a la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial, de modo que el análisis morfométrico de una cuenca trata de medir la erosión de los cursos de agua interpretando las características geométricas (longitudinales, de superficie, etc.) de los elementos de las redes de drenaje. En este sistema geométrico, en principio considerado como plano, se abordan inicialmente las longitudes de los cauces (valor unidimensional) y, luego, las superficies de las cuencas (valor bidimensional). Así pues, el análisis morfométrico, pretende cuantificar la evolución en el paisaje fluvial y definir el estadio en que se halla y, así, valorar su estado erosivo.

El sistema de análisis utilizado por Strahler sigue una serie de pautas que se describen a continuación:

- Estudio de la jerarquización de los cauces.
- Cálculo de la longitud de dichos cauces y de las respectivas relaciones de bifurcación que experimenta la red de drenaje.
- Análisis similar de las áreas parciales de las subcuencas jerarquizadas que forman la cuenca estudiada.

- Relación del área total de la cuenca con el caudal, para lo cual se estima el caudal medio de cada cuenca.
- Cálculo de las pendientes medias de los cauces, tanto longitudinales como transversales.
- Cálculo de la Densidad de Drenaje, como uno de los factores principales de degradación de la cuenca.
- Cálculo del «Índice de frecuencia» y «Coeficiente de torrencialidad».

A ello añadimos algunos parámetros morfológicos de interés hidrológico en los que centraremos el presente trabajo, dado que consideramos que son aspectos interesantes de añadir al análisis morfométrico.

Una de las ventajas de estos sistemas de análisis es su rápida interpretación y posible comparación con otras cuencas. En el caso de la morfología, a través de modelos; en el caso de la morfometría mediante gráficas logarítmicas y semilogarítmicas que se realizan para tal fin, aportando una definición del tipo de cuenca y de su posible evolución con un simple trazo.

Los análisis de redes fluviales (morfológicos y morfométricos) precisan de fotointerpretación, especialmente para determinar y trazar la red de drenaje. Al mismo tiempo, es muy útil comparar fotografías aéreas de años distanciados con el objeto de precisar la degradación (regresión de la cuenca y multiplicación del número de cauces) y cambios de los canales de drenaje. Este procedimiento es ampliamente desarrollado por autores como Gregory & Walling (1973), Stoddart & Kirkby (en Chorley, R.J., 1969) y Knighton (1984), quienes también se ocupan de cuantificar las pérdidas de material o aporte de sedimentos de grandes cuencas mundiales (basándose en Holeman, 1968), así como de proponer modelos para la cuantificación práctica.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

En lugar de limitarnos a calibrar los parámetros morfométricos clásicos, hemos utilizado una serie de aspectos cualitativos, morfológicos, de las redes de drenaje; aspectos que, a priori, pueden identificar características de la dinámica fluvial y que posteriormente han sido contrastados con los valores morfométricos e hidrológicos de una cuenca de tamaño medio (río Vélez, prov. de Málaga, 610 km²).

Dada la amplitud del trabajo, presentamos a continuación tan sólo la valoración teórica de los resultados, con objeto de que pueda ayudar a la reflexión crítica de este campo de investigación. Para el conocimiento de resultados morfométricos aplicados al territorio, nos remitimos a trabajos

anteriores (Senciales, 1990; Senciales & Ferre, 1992 y 1993; y Senciales, 1995).

4. PROCEDIMIENTO

Consideramos como escala de trabajo más apropiada para la representación de los elementos fluviales de una cuenca la 1:10.000. Por su parte, la fotografía aérea, imprescindible para determinar la jerarquía de los cauces (sobre todo de primer orden) y determinar la red de drenaje, puede oscilar entre 1:10.000 y 1:20.000, por cuanto que su traslado a la cartografía 1:10.000 no ofrece mayores dificultades.

El análisis morfológico realizado se centra en una serie de aspectos en los que ha sido necesaria la aclaración de algunos términos y la utilización de diversas fórmulas no cuantitativas de procesos sino útiles para establecer una valoración tipológica con un criterio riguroso. Los aspectos tratados han sido los siguientes:

- Tipología:
 - Definición de cauce.
 - Jerarquización de los cauces.
 - Tipología de redes.
 - Forma del cauce. Sinuosidad.
 - Tipos de lechos.

Las conclusiones extraídas del análisis tipológico y la comparación con los resultados morfométricos, posibilitan la definición de características genéticas y evolutivas de una cuenca fluvial.

5. CARACTERES CUALITATIVOS DE LA RED DE DRENAJE. LA MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

Los caracteres cualitativos de la red de drenaje vienen a definir la morfología de la cuenca o de algunos aspectos de ésta. Puesto que el elemento constituyente de la red de drenaje es el cauce, previamente, se hace necesaria abordar su definición.

5.1. El elemento fundamental de la escorrentía concentrada: el cauce

Consideramos la cuenca hidrográfica como «...un *sistema abierto* que recibe energía y materia del clima y procesos endogenéticos y la pierde a través del caudal y la carga de sedimentos» (Gregory & Walling, 1973).

Si bien el análisis morfométrico requiere tratar la cuenca hidrográfica como un sistema abierto, son los cauces las áreas donde la energía y materia se concentran y por ellos discurre el caudal y la carga de sedimentos. En ellos tiene lugar el transporte de sedimentos, que conlleva, por una parte, el arranque de unas áreas y, por otra, el depósito en otras, tendiendo al perfil de equilibrio.

La red de drenaje se genera a partir de la bifurcación de los cauces, o, visto de otro modo, es la unión de infinidad de cauces la que da lugar, en una reducción progresiva del número de éstos (que consigue el aumento de su energía erosiva por adición de fuerzas), a la creación de una única red de drenaje que termina en un nivel de base dado, bien sea de elección (confluencia en un punto dado –normalmente otro río– a partir del cual podemos considerar una red de drenaje que se haya de estudiar), o bien sea un nivel de base natural: local (lago o área endorreica), o general (el mar).

Pero se plantean algunas preguntas: ¿Qué es un cauce?, ¿dónde empieza exactamente?, ¿qué dimensiones mínimas tiene? La primera pregunta, aparentemente simple, entraña graves problemas de definición.

Según Strahler (1968), cuando «...*la erosión laminar adquiere mayor intensidad, se origina la erosión en surcos, que se caracteriza por la formación en el suelo y el subsuelo de innumerables acanaladuras muy poco espaciadas...*», «...*Si estos surcos no se destruyen al cultivar el suelo, pueden comenzar pronto a transformarse en grandes depresiones llamadas barrancos...*» y «...*Finalmente, de la erosión acelerada del suelo a la que no se ha puesto impedimento puede resultar una escabrosa y árida topografía semejante a las cárcavas de los climas áridos*». «*El cauce de una corriente de agua puede considerarse como un largo y estrecho canal tallado por la fuerza del agua mediante el que se hace más efectivo el movimiento de la misma y de los sedimentos aportados desde la cuenca. Los cauces pueden ser tan estrechos que pueden pasar unos por encima de otros, o llegar a 1'5 km en grandes ríos... Si consideramos que toda la gama de anchuras puede estar comprendida entre 30 cm y 1'5 km, observamos que la diferencia puede llegar a ser hasta 5.000 veces mayor*».

Pero, si un canalillo empieza desde la primera incisión, centimétrica, ¿dónde ha de llamarse barranco y dónde cárcava?, ¿dónde empieza el cauce de un río?, ¿desde el primer canalillo?, ¿desde el primer barranco? Strahler no especifica las dimensiones mínimas, salvo, si cabe, en la referencia a 30 cm.

López Bermúdez *et al.* (1988) exponen: «...*El principal problema con que nos encontramos al medir la longitud de un cauce es la identificación del punto de origen... en especial en aquellos cauces de orden o magnitud uno (cauces iniciales)... La resolución de este problema lleva consigo una decisión subjetiva, cuya certeza dependerá de la experiencia del autor y de la escala y calidad de la información manejada*».

Queda la precisión condicionada por la escala utilizada y por la «fineza» del investigador. Ello entraña un grave riesgo: dos investigadores pueden obtener longitudes y densidades muy diferentes según la escala que empleen y la agudeza visual que posean. Así, se omite el principio científico de la rigurosidad en beneficio de una mayor rapidez en el trabajo, pues a una escala de menor detalle se puede trazar la red fluvial con mayor rapidez y analizar su morfometría con menor dificultad, pero no se obtienen valores reales.

Tras utilizar diversas escalas y contrastarlas en el campo, hemos llegado a la conclusión de que la cartografía más apropiada para este tipo de cuencas es la 1:10.000, mapas de fácil obtención y cuyo detalle permite resoluciones en el trazado (longitud) de los cauces de hasta 10 m (1 mm en la cartografía), corroborando lo apuntado por Jardí (1985) en este sentido (escalas 1:10.000 a 1:25.000 para superficies de análisis entre 100 y 1.000 km²). Asimismo, la fotografía aérea, imprescindible, a nuestro juicio no debe ser de menor detalle que 1:20.000, dada la dificultad de precisar los extremos de los cauces con el rigor necesario en escalas superiores.

Se trata de delimitar claramente dónde acaban los procesos de erosión laminar y dónde la erosión linear se confirma como un proceso estable. La convergencia de procesos de arroyada difusa a lo largo de una ladera desemboca con frecuencia en procesos de erosión linear, producto de la concentración de la arroyada.

Se suele traducir del inglés los términos *rill* y *gully* y del francés *ravine* como canalillo (o surco), cárcava y barranco, respectivamente. El significado castellano de los términos cárcava y barranco nos apunta en ambos casos hacia topografías escarpadas y fuertemente erosionadas; por lo que es necesario buscar una terminología diferenciadora más apropiada; sin embargo, no hemos encontrado el sinónimo que indique con mayor propiedad el fenómeno sin que conlleve el matiz del proceso que lo genera:

- Arroyo: corriente de agua de escaso caudal y cauce por donde corre. Corriente de cualquier cosa líquida.
- Arroyuelo: arroyo de pequeñas dimensiones.
- Barranco: despeñadero, precipicio. Hendidura profunda que hacen en la tierra las aguas.
- Canal: cauce artificial por donde se conduce el agua para darle salida para diversos usos.
- Canalillo: Canal pequeño; surco pequeño que deja un líquido al verterse.
- Cárcavas: barrancos separados por aristas que la erosión excava en materiales blandos sin vegetación.

- Cauce: Lecho de ríos y arroyos. Conducto descubierto por donde corren aguas para riegos y otros usos.
- Hondonada: parte del terreno más honda que alrededor. Depresión.
- Regato: arroyo muy pequeño. Charco formado de un arroyuelo. Remanso poco profundo. Acequia.
- Reguera: surco de riego para infiltración.
- Reguero: hilo, corriente o chorro muy delgado de un líquido que se desliza sobre una superficie. Huella o señal de un líquido u otra cosa que se ha vertido.
- Reguerón: reguero de grandes dimensiones.
- Río: corriente natural de agua, continua, más o menos caudalosa.
- Surco: hendidura hecha en tierra con el arado. Señal o hendidura que deja una cosa al pasar sobre otra.

Aceptando surco y barranco como traducción válida de *rill* y *ravine*, el problema se reduce a sustituir el término cárcava. Dado que reguero suele utilizarse con frecuencia como sinónimo de surco y como traducción de *rill*, los términos más apropiados podrían ser reguerón o regato; términos que, en ambos casos, poseen un sentido lineal del que carece el término cárcava. Tanto reguero como reguerón hacen referencia a la huella dejada por el líquido y no necesariamente al líquido circulante (como sucede con regato), «reguerón» podría ser el término más apropiado, pese a la cacofonía que introduce el uso de un superlativo.

Hemos atendido varias propuestas a la hora de delimitar dimensionalmente estos términos.

La definición del término «*gully*» más extensa la aportan Gregory & Walling (1973), basándose en Brice (1966), quien lo describe como «*canal de drenaje extendido recientemente que transmite un flujo efímero, tiene laderas escarpadas, una inclinación fuerte o una cabecera vertical, con un ancho mayor de 0'3 m y una profundidad superior a 0'6 m*» Estos autores amplían la definición admitiendo la posibilidad de tener forma tanto en V como en U, en función del suelo sobre el que se desarrollen. Añaden que son más largos que los «*rills*»; que suelen estar bordeados por escarpes y que su profundidad impide su restauración mediante herramientas normales, ser cruzados por ruedas de un vehículo o ser eliminados por labranza.

Van Zuidam (1977) asigna únicamente la dimensión profundidad para distinguir los diversos términos:

Surco: < 50 cm Reguerón: 50-300 cm Barranco: > 300 cm

Este mismo autor, tras presentar tales dimensiones, especifica el estado erosivo, por erosión linear, en función de la distancia entre surcos, reguerones o barrancos.

Perles Roselló (1995) ponderó dimensiones teóricas contrastándolas con las dimensiones reales en algunos puntos de nuestro área de análisis (cuena del río Vélez), para cuantificar el volumen de tierra desalojado en cada una de las formas de erosión linear analizadas (definidas por la autora como «surcos», «cárcavas» y «barrancos»). Partiendo de unas dimensiones teóricas asignadas a partir de la marca de clase de los intervalos de profundidad propuestos por Van Zuidam, se asignan dimensiones similares para anchura y profundidad:

25 cm: Surcos 150 cm: Cárcavas > 300 cm: Barrancos

A continuación, Perles Roselló calibra estas dimensiones con los valores obtenidos en un muestreo de campo, proponiendo las siguientes dimensiones medias:

	Ancho (cm)	Profundidad (cm)	Longitud (cm)
Surcos	70	42	239
Cárcavas	285	172	328
Barrancos	400	383	263

Esta misma autora ha intentado comparar tales definiciones con la terminología hortoniana (cauces de primer, segundo y tercer orden respectivamente), con resultados negativos.

Los resultados no pueden ser positivos en cuanto que, en algunos casos, pueden llegar a encontrarse cauces de primer orden (es decir, sin adición de tributarios) de dimensiones desde 20 m de longitud a más de 1.000 m, con un aumento progresivo en los más largos tanto del ancho como de la profundidad.

Son terminologías muy diferentes puesto que parten de puntos de vista muy distintos: por una parte los términos surcos, cárcavas o reguerones y barrancos hacen referencia directa, a partir de sus dimensiones, a la magnitud del proceso de erosión linear que los ha formado; en cambio, los términos morfométricos se refieren, como veremos más adelante, a la mera clasificación hidrológica a partir de sucesivas confluencias que han de aumentar la energía del flujo, independientemente de las dimensiones que presente el cauce.

Pero buscamos el punto de origen de los segmentos de cauce para lograr determinar dónde se inicia una red hidrográfica; por ello, hemos de tomar algunas dimensiones mínimas que nos permitan distinguir un cauce, estable, de un surco o de un canalillo cambiante en cada aguacero.

Creemos apropiada la definición antes expuesta aportada por Gregory & Walling, en el sentido de la dificultad de destrucción por labranza o con simples herramientas manuales. Pero no así en cuanto a las dimensiones: los autores describen «*gully*» en su acepción castellana de «*cárcava*», al definirlo como cauce de laderas escarpadas; pero la gran mayoría de los pequeños cauces carecen de tales laderas escarpadas. Además, hay que destacar la discontinuidad de las cárcavas, que no necesariamente se prolongan en una red de drenaje.

La clasificación propuesta por Perles Roselló nos parece muy válida, en cuanto que son valores ponderados en el campo, y en cuanto que son términos acordes con los que aquí señalamos (salvo en lo que respecta a la denominación). Pero no buscamos los valores medios, sino los mínimos, a partir de los cuales se concentra de forma permanente la escorrentía.

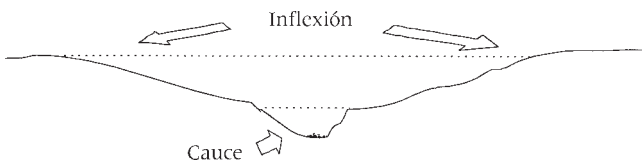
Aceptando las dimensiones medias propuestas por Perles Roselló para el análisis de la erosión lineal en una ladera, proponemos (Senciales, 1995) como punto de origen de un cauce aquél en que la erosión lineal ha conseguido excavar el terreno hasta alcanzar la denominación de «surco», es decir, toda incisión lineal cuyas dimensiones superen los 25 cm tanto de anchura como de profundidad (valor medio del intervalo en la definición propuesta por Van Zuidam). Sin embargo, dado que esta dimensión mínima aún puede ser retocada por la intervención humana, incrementamos las dimensiones mínimas hasta 30 cm, como dimensiones que Gregory & Walling señalan de difícil modificación y que superan la profundidad normal que alcanza un arado.

La propuesta de estas dimensiones se basa en la permanencia de las incisiones lineales superiores a 30 cm de profundidad y anchura: mientras que un canalillo de dimensiones inferiores suele ser fácilmente eliminado con el laboreo, un surco de más de 30 cm de ancho y profundo necesita acciones especiales para ser modificado sin dificultar el laboreo: la corrección del canal formado requiere un tratamiento específico, máxime si éste se prolonga ladera abajo. Además, mientras que los divagantes «canalillos de escorrentía» pueden cambiar de trazado tras unas lluvias, los surcos, más estables, tienden a ahondarse y, salvo precipitaciones excepcionales, suelen perdurar en su trazado estación tras estación, si el hombre no lo evita por medio de labores especiales.

Pero hay una tercera dimensión, la longitud mínima, que estimamos ha de ser superior a 20 m. Esta dimensión es el valor mínimo identificado a partir de la fotografía aérea y cartografía 1:10.000 (2 mm de longitud en la cartografía) y se corresponde con las dimensiones de las frecuentes acanaladuras que surcan las paredes de los valles en las áreas pizarrosas y esquistosas del área de estudio abordada. Dimensiones inferiores obedecen en mayor medida a un proceso de abarrancamiento localizado y variable ante aguaceros, que a un proceso de generación de una red de drenaje propiamente.

Los surcos de las dimensiones mínimas propuestas ($0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) se detectan mediante fotografía aérea: un canal de 1,8 m de ancho equivale a un trazo de 0,1 mm de ancho en un fotograma a escala 1:18.000, lo que comprobamos mediante delineación que es claramente perceptible, al igual que un trazo de 0,05 mm de ancho (90 cm de ancho). Para identificar surcos de dimensiones inferiores, aunque es posible mediante un estereoscopio con lentes de aumento, se requiere gran agudeza visual, o bien, deben trazarse con posterioridad al trabajo de campo. Generalmente estos surcos suelen ser de dimensiones superiores o muy superiores a las mínimas aquí propuestas, corroborado por la calibración de Perles Roselló, antes comentada. Por otra parte, coincidimos en considerar que los «gullies» constituyen «una red bien ramificada con excavados de orden métrico» (López Bermúdez, 1984), frente a la erosión mal jerarquizada de los «rills» (de dimensiones menores).

Para el objetivo que nos ocupa no sólo tienen interés las dimensiones sino también el hecho de que, independientemente de éstas, el surco excavado suele acompañarse de una clara depresión en el relieve, previa a su incisión. A ello se añade la presencia de material desagregado y removido en el fondo, como evidencia de la concentración de la escorrentía:



Puede no existir un surco claramente y, sin embargo, darse una clara inflexión en el relieve que conduzca las aguas de escorrentía hacia un fondo, concentrándolas. Cualquier precipitación que se suceda llevará a converger las aguas de escorrentía hacia esta zona de inflexión, que actuará como cauce, encajado o no. Asimismo, en un relieve plano o casi plano, una zanja de más de 30 cm de profundidad y anchura funciona como canal de drenaje de las aguas de lluvia.

Proponemos así dimensiones y formas mínimas de sistemas de arroyada concentrada donde pueden incluirse las cárcavas, aunque no necesariamente referidas a las incisiones en V o en U cerradas que estas formas implican; por el contrario, hacemos extensible la denominación de cauce a cualquier incisión en el relieve que dé origen a arroyada concentrada y que implique profundidades y amplitudes mayores de 30 cm continuadas a lo largo de más de 20 m hasta la unión con cauces de dimensiones similares o superiores.

Así pues, una red de drenaje se genera desde el momento en que se produce en el relieve cualquier inflexión capaz de concentrar las aguas de escorrentía, superando unas dimensiones mínimas —que proponemos en $30 \times 30 \times 20$ m—, que no pueda ser destruida por labranza o modificada por precipitaciones de corto período de retorno, y que además continúe a lo largo de la ladera sobre la que se desarrolla hasta unirse con otro cauce, de dimensiones semejantes o superiores; y así sucesivamente hasta crear una red de drenaje jerarquizada.

En un área de «*badlands*» consideraremos las mismas dimensiones, lo cual puede significar una densidad de drenaje extremadamente densa, que por otra parte es cierta, aunque signifique una sobrecarga en el trabajo de análisis del geomorfólogo. También hay que señalar que en áreas de fuerte arroyada las incisiones pueden llegar a alcanzar dimensiones importantes, desapareciendo pocos metros más abajo o siendo sustituidos por coladas de piedras, como señalan los estudios en zonas de campos abandonados del Pirineo y de la Cordillera Ibérica (Ruiz Flaño & García Ruiz, 1990). En este caso, por tanto, se trata de incisiones inestables y no del inicio de una red de drenaje o cauce estable de primer orden. Esta precisión ya es apuntada por los autores arriba citados y añaden que, conforme aumenta el tamaño de una cuenca, se produce un incremento de las incisiones producidas a lo largo de la misma, de modo que la discontinuidad de los canalillos de arroyada tan sólo se viene a producir en las partes más altas de una microcuenca.

Algunas redes de drenaje pueden desaparecer decenas de metros e incluso kilómetros después de haber sido organizadas, por abrirse a una llanura aluvial transformada por laboreo, o bien por desaparecer en un sumidero kárstico. En el primer caso la red de drenaje permanece latente, sin un trazado definido, pero conservando la capacidad de escorrentía de la red organizada cada vez que funciona; potencialmente, las áreas más deprimidas deben ser el cauce natural. En el segundo caso se identifica como una auténtica red cuyo nivel de base es el sumidero y que carece de conexión con cualquier otra red.

5.2. La jerarquización de los cauces y la identificación del colector principal

El análisis morfométrico y morfológico de una cuenca requiere establecer la jerarquía de los cauces de la misma, subdividiéndola en «segmentos de cauces» de diverso orden. Se entiende que un «segmento de cauce» es de primer orden cuando es uno de los extremos de la red que no recibe ningún cauce tributario, es decir, aquél que inicia la red de drenaje y la continúa de acuerdo con la definición de cauce antes expuesta (dimensiones mínimas, jerarquización, permanencia).

Cuando confluye con otro segmento de primer orden, dan lugar a un segmento de segundo orden, el cual mantiene su orden jerárquico si recibe otro segmento de primer orden; en cambio, al unirse con un nuevo segmento de segundo orden dan lugar a uno de tercero, y así sucesivamente.

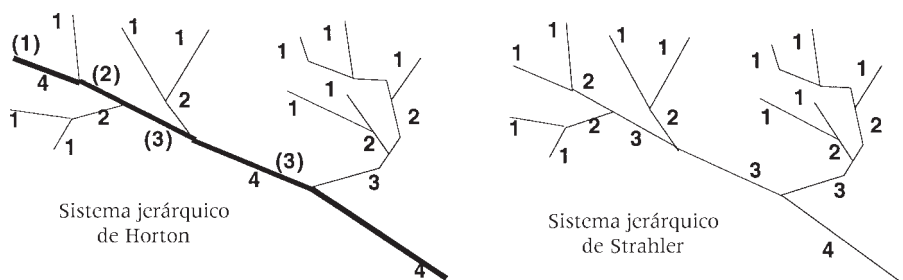
Para Horton (1945) debe hacerse una reclasificación posterior basada en identificar el cauce principal de la red: aguas arriba, en una confluencia de segmentos de cauce idénticos, el cauce principal, y por tanto el que conserve la jerarquía de segmento de orden superior, será el que confluya con menor ángulo en el segmento aguas abajo. A igualdad de ángulos se elegirá el cauce de mayor longitud, repitiéndose este proceso hasta los cauces de primer orden, de entre los cuales habrá uno que, al ser reclasificado pasará a poseer el número de jerarquía más alto de la cuenca: siguiendo el ejemplo del dibujo posterior, una cuenca de cuarto orden presentará, según este sistema, un segmento de cuarto orden que se extienda desde la desembocadura hasta la divisoria de aguas.

Pese a existir diversas propuestas a la hora de analizar la bifurcación de una cuenca y asignarle una cifra de jerarquización, el sistema más empleado es el que hemos seguido en este estudio, basado en la modificación parcial de las leyes de Horton por parte de Strahler (1964). Esta modificación consiste en la supresión de la segunda fase de reclasificación de la jerarquización, de forma que no existe segmento de orden superior a 1 que se inicie en divisoria de aguas alguna.

6. TIPOLOGÍA DE LAS REDES DE DRENAJE

Definida la red a partir del modelo propuesto por Strahler es posible la identificación de diversas tipologías de redes de drenaje a lo largo de una misma cuenca.

Para el estudio de la tipología de las redes hemos de hacer mención a la tipología de redes de drenaje establecida por Howard (1967) y que ha sido



con gran frecuencia empleada por diversos trabajos sobre morfometría, de entre los que podemos destacar los de Chorley (1969), Naudin & Proud'homme (1971), Gregory & Walling (1973), Van Zuidam (1978), Way (1978), Selby (1985), y López Bermúdez *et al.* (1988).

Esta clasificación asocia diversos tipos de redes a diferentes sistemas morfodinámicos, bien con origen en causas climáticas, bien en causas litológicas y estructurales, o bien en ambas combinadas; tipos de redes que, por no extendernos en exceso, omitimos, remitiéndonos a la bibliografía apuntada.

La utilidad del análisis de la tipología de redes es incuestionable, ya que con la mera observación cartográfica se apuntan posibles procesos que tienen lugar en el área que va a ser analizada, sea con origen en causas climáticas, sean estructurales y litológicas o sean topográficas. Ya la tipología de la red indica el posible origen de valores cuantificados en una siguiente fase del análisis morfométrico (relación de bifurcación, densidad de drenaje); por ello, debemos considerar que éste es un aspecto cualitativo a tener siempre presente, como base práctica y de referencia de cualquier valor numérico del análisis cuantitativo.

Explicadas las características necesarias, a partir de las cuales hemos considerado los cauces de primer orden o el comienzo, desde su origen, de una red de drenaje, se plantea un nuevo escollo, que también ha sido abordado, con muy diversos enfoques, por los investigadores que han tratado este tema. Ahora se trata de identificar el cauce principal en una red de drenaje.

Es habitual el uso de tres criterios diferentes para la determinación de dicho cauce principal:

- a) El criterio topográfico, por el que el cauce principal es aquél cuya cabecera alcanza la cota máxima.
- b) El criterio de longitud, por el que el cauce principal es el más alejado del nivel de base.

c) El criterio hidrológico, por el que el cauce principal es el que tiene su origen en un manantial importante. Este criterio es el utilizado habitualmente en la toponimia y en la cartografía.

El tipo de cauce principal según criterio hidrológico es el menos común, de modo que usualmente se considera alguno de los dos primeros que, con frecuencia, pueden coincidir. En nuestro caso se tomaron los dos primeros criterios, aunque el análisis morfométrico requiere, sobre todo, el estudio desde el punto de vista topográfico, atendiendo a la máxima diferencia de cotas dentro de la cuenca (Romero Díaz, 1989).

Existe un cuarto criterio para considerar el cauce principal, propuesto por Horton (1945) y que tiene un contenido geométrico. Consiste en asignar la categoría de tal a aquel cauce cuyo ángulo de confluencia sea menor respecto al valle principal. Dado que en numerosas ocasiones este modelo lleva a determinaciones de cauces principales bastante absurdas (en redes radiales o en redes retorcidas), omitimos su consideración.

Para la definición del cauce principal no es necesario conocer con precisión el punto exacto de origen del canal de primer orden, pues se toma como punto de origen la divisoria de aguas, siendo su final el punto de desagüe, bien sea en el nivel de base o bien en el área de control seleccionada.

7. SINUOSIDAD DEL CAUCE PRINCIPAL

Determinado el cauce principal de una red de drenaje, el conocimiento de su sinuosidad puede revelar una serie de hechos tanto históricos como presentes de la fuerza de la acción lineal a lo largo de un cauce.

La mayor sinuosidad suele ser frecuente en cauces de poca pendiente, frente a una baja sinuosidad representativa de un cauce de mayor pendiente y, por ello, con mayor fuerza erosiva. Otras veces tiene su origen en causas estructurales, ya que se origina una alta sinuosidad cuando existe una red de fallas que modifica el trazado del cauce, así como también se puede originar en el caso de un sustrato rocoso muy resistente que se opone a la profundización del cauce y sólo lo permite siguiendo el trazado de pequeñas fracturas que puedan existir. Sin embargo, no debe olvidarse que una falla de considerable extensión puede llegar a condicionar un trazado rectilíneo en un área de baja pendiente. Por tanto, en áreas sin control estructural, una alta sinuosidad revela baja fuerza erosiva, o bien gran resistencia del sustrato a la acción lineal.

El cálculo de la sinuosidad es propuesto por Schumm, quien la define de la siguiente forma: «...*el desarrollo de meandros existentes en el cauce principal de*

un río, y su cálculo se obtiene poniendo en relación la longitud de dicho cauce con la longitud máxima del valle que forma» (Schumm, 1963).

Pueden medirse tres tipos de índices de sinuosidad en una cuenca dada. Son tres parámetros basados en la medición de la longitud del cauce principal (LC), longitud media del valle (LV) y distancia más corta entre inicio y final del cauce (LD) (Mueller, 1968). A partir de aquí se calculan tres índices de sinuosidad:

Sinuosidad total: LC/LD. Sinuosidad topográfica: LV/LD. Sinuosidad hidráulica: LC/LV.

Básicamente, se ha hecho uso del Índice de Sinuosidad Hidráulica. Con frecuencia, en áreas de montaña, la longitud media del valle y la longitud del cauce principal coinciden, lo que lleva a obtener un índice de sinuosidad hidráulica igual o escasamente superior a 1. Sólo en áreas donde el valle se abre y permite el desarrollo de grandes meandros en la llanura de inundación aparecen diferencias entre longitud del valle y longitud del cauce: esto ocurre preferentemente en cursos bajos de los ríos, que es donde las llanuras aluviales adquieren mayor amplitud. La medición de la longitud media de un valle resulta complicada cuando gran parte del mismo discurre por áreas abiertas cuyos límites son imprecisos.

Schumm (1963) propuso cinco tipos de cauces, asignándoles un índice de sinuosidad (cuadro 1):

Cuadro 1. *Índices de sinuosidad.*

<i>Tipo de canal</i>	<i>Índice de sinuosidad</i>
Canal rectilíneo	1-1,2
Canal transicional	1,2-1,5
Canal regular	1,5-1,7
Canal irregular	1,7-2,1
Canal tortuoso	> 2,1

Fuente: Schumm (1963).

En 1985, Morisawa, modifica la clasificación de Schumm, ya que introduce, junto con el índice de sinuosidad, los valores de anchura y profundidad y teniendo en cuenta, además, información y matices respecto a la tipología de cauce (Morisawa, 1985) (cuadro 2).

Añade Morisawa el tipo de carga sólida acarreada normalmente por los caudales de estos cauces y los procesos erosivos frecuentes en ellos. Los canales rectilíneos suelen llevar carga de fondo o de todo tipo, con baja

Cuadro 2. Índices de Sinuosidad.

<i>Tipo de Canal</i>	<i>Índice de Sinuosidad</i>	<i>Relación ancho/profundidad</i>
Rectilíneo	< 1,05	< 40
Sinuoso	1,05-1,50	< 40
Meandrizante	> 1,50	< 40
Entrelazado	> 1,80	> 40
Anastomosado	> 2,00	< 10

Fuente: Morisawa (1985).

actividad de ensanchamiento del cauce y alta actividad de la incisión. Los canales sinuosos se caracterizan por llevar carga de todo tipo, siendo frecuente el ensanchamiento e incisión del cauce. Los meandrizantes suelen llevar carga en suspensión o de todo tipo, generando incisión del canal y ensanchamiento en meandros. En canales entrelazados predomina la carga de fondo y el ensanchamiento del cauce. Y en canales anastomosados es usual el material en suspensión y un lento ensanchamiento de los meandros.

Pese a la cuantificación que requiere este análisis, se pretende una clasificación tipológica, cualitativa. Así pues, de nuevo, caracteres cualitativos de la red de drenaje indican causas estructurales y denudativas, que pueden dar lugar a previsibles cambios y, por tanto, a modificaciones progresivas de los cauces; ello implica una peligrosidad natural para las actividades humanas que tienen lugar en sus orillas; por ejemplo, los campos de cultivos localizados en orillas convexas de los meandros.

8. TIPOLOGÍA DEL LECHO DEL CAUCE PRINCIPAL

Un factor importante que incide en el tipo de canal de drenaje es la litología sobre la que discurre. Knighton (1984) realiza un estudio de las características de los diferentes lechos que se producen según el sustrato por el que discurren (Cuadro 3).

Atendiendo a los diversos tipos de lechos en función del sustrato sobre el que se desarrollan, las características de éstos pueden variar entre predominio de material fino y predominio de grandes cantos, cuyo tamaño y peso revelan mayor dificultad para ser movidos. Entre ambos tipos existe una gran variedad de tamaños de partículas, además de la posibilidad de presentarse el lecho de roca viva.

El área de una cuenca experimenta procesos erosivos más intensos cuanto mayor sea el tamaño de las partículas que presenta su lecho, aunque éstas se muevan con mayor dificultad e intervalo de tiempo. En las cabeceras, debido principalmente a las pendientes, suelen ser más frecuentes los frag-

Cuadro 3. *Relación sustrato-tipo de lecho.*

<i>Tipo primario</i>	<i>Tipo secundario</i>	<i>Características</i>
Roca cohesiva o coherente	Lecho rocoso	– Cobertura no coherente de material inconsolidado; en general, cortos segmentos concentrados en escarpadas cabeceras alargadas.
	Lecho limo-arcilloso	– Alto contenido de arcilla limosa, con variables grados de cohesión; resistencia controlada por fuerzas interparticulares.
Roca no cohesiva o no coherente	Lecho arenoso	– «Lecho vivo», compuesto de material arenoso transportado en diversos tipos de descargas.
	Lecho de grava	– Canales «umbral» de gruesa grava o guijarros, sólo transportados en altas avenidas.
	Lecho de cantos	– Compuesto por grandes partículas (> 256 mm) movilizadas infrecuentemente. Cercano al tipo de lecho rocoso.

Fuente: Knighton (1984).

mentos mayores del lecho, salvo áreas de rellanos. Por otro lado, la existencia de un lecho de grava (partículas menores de 6,4 cm, según Gregory & Walling, 1973), que pueden presentarse con frecuencia en zonas de transporte y rellanos de cabeceras, nos indica que se trata de una zona intermedia entre alta y baja intensidad de los procesos erosivos y donde se depositan sedimentos de tipo medio, sólo transportados durante avenidas. Finalmente, los depósitos aluviales más finos, que dan lugar a los lechos arenosos y limosos, revelan continuos procesos de transporte y depósito, es decir, suelen depositarse en aguas tranquilas y de flujo preferentemente continuo, siendo habitual encontrarlos en zonas de baja pendiente. No obstante, cualquier tamaño de partículas puede aparecer en cualquier área de un curso fluvial, si bien el predominio del tamaño de las partículas es el que nos revela la fuerza y sistema erosivo predominante en el curso fluvial considerado.

Por ello, la determinación de los tamaños de las partículas predominantes presentes en los cauces de una cuenca puede indicar las áreas donde la erosión lineal incide de manera más acusada, arrancando material de las laderas y transportándolo aguas abajo hasta unas distancias dependientes de la energía que alcance la corriente. La abundancia de fracciones finas nos indica una zona de remansos, o bien una llanura de inundación, donde la

velocidad del agua disminuye, en cuanto que se reduce la pendiente, y donde la lámina de agua puede expandirse por áreas más extensas que en un cauce o un valle cerrado. En cuanto a la ubicación de las partículas según su tamaño, en el sentido transversal del cauce, las partículas gruesas de una crecida quedan depositadas, generalmente, en las inmediaciones del lecho menor, mientras las partículas finas pueden llegar hasta los bordes laterales de la crecida, donde la velocidad del agua es menor y donde se depositan por procesos de decantación. En los remansos, sin embargo, las partículas gruesas quedan al principio del mismo, mientras que las finas suelen predominar en los bordes, fondos aguas abajo y en las orillas convexas.

La definición cualitativa (descriptiva) del tipo de lecho característico cobra gran importancia dado que entra en conexión directa con la cuantificación necesaria para conocer la velocidad del caudal a partir del «número de Rugosidad» de Manning (n), en el que interviene tanto el tipo de lecho como la vegetación que lo ocupa o bordea. Este índice es de especial importancia en los análisis hidrológicos.

9. RESULTADOS. APLICACIÓN A UNA CUENCA REAL. LA CUENCA DEL RÍO VÉLEZ

A grandes rasgos, la cuenca del río Vélez se localiza en el sector oriental de la provincia de Málaga, con una superficie aproximada de 610 km², una altitud máxima de 2.065 m (pico Maroma) y una mínima de 0 m (mar Mediterráneo); dada su forma romboidal y la cercanía al mar de la cota más elevada, las acusadas pendientes son una constante en gran parte de la cuenca. Sin embargo, es necesario apuntar un sustrato geológico altamente variado que incluye materiales de las Unidades Externas, Intermedias e Internas de los Sistemas Béticos, predominando los esquistos y pizarras, en la zona más cercana al mar, y las calizas, dolomías y mármoles en las sierras divisorias de aguas.

Realizada la estructuración de cuencas mediante el conteo de cauces, la identificación de tipologías y de los cauces principales en el área de estudio, esta información fue complementada con la identificación de las características de los lechos de dichos cauces mediante trabajo de campo.

Se reconocieron 26 unidades de diagnóstico de tamaño variable y de órdenes iguales o superiores a 6 (6, 7, 8 y 9), englobando las de órdenes superiores a buena parte de las de órdenes inferiores (el noveno orden a todas, al ser el orden final de la cuenca). Una vez jerarquizada la cuenca, se procedió a la identificación de las diversas tipologías (cuadros 4 y 5).

Cuadro 4. *Número de segmentos de cauces de los diversos órdenes jerárquicos de la cuenca del río Vélez.*

Orden jerárquico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	TOTAL
Cuenca del río Vélez	1	2	4	19	82	434	2.015	10.125	43.484	56.166

Fuente: Senciales (1995).

Cuadro 5. *Tipología de las principales subcuencas del río Vélez.*

<i>Subcuencas de 6.º orden</i>	<i>Subcuencas de 7.º orden</i>	<i>Subcuencas de 8.º orden</i>	<i>Cuenca del río Vélez (9.º orden)</i>
Iznate (Dendrítica)			
Almáchar (Dendrítica)	Almáchar (Dendrítica)		
El Borge (Dendrítica)			
Cútar (Subdendrítica)		Benamargosa (Dendrítica)	
La Caldera (Dendrítica)			
Las Cañas (Dendrítica)	Benamargosa (Dendrítica)		
La Cueva (Subdendrítica)			
La Morra (Subdendrítica)			
Guaro (Retorcida)			Dendrítica
Seco (Subparalela)			
Pte. Piedra (Angulada)			
El Alcázar (Subdendrítica)	Guaro (Subdendrítica)		
Bermuza (Paralela)			
Almanchares (Angulada)		Vélez (Subdendrítica)	
Sedella (Dendrítica)			
La Fuente (Subparalela)	Robite (Subdendrítica)		
Salares (Subparalela)			
El Mineral (Dendrítica)			

Fuente: Senciales (1995).

Las redes retorcidas y anguladas tienen origen en causas estructurales (frentes de cabalgamiento, redes de falla, discontinuidades litológicas...).

Por su parte, las redes subparalelas y paralelas se originan fundamentalmente por causas orográficas (fuertes pendientes que condicionan trazados rectilíneos a causa de la energía hídrica), salvo, en contadas excepciones, cuando se presenta alguna falla de considerable extensión o alguna discontinuidad litológica rectilínea. En algunos casos se conservan ciertos aspectos dendríticos (red en lengüeta) por causas litológicas, pero el desnivel condiciona fundamentalmente la red.

Finalmente, las redes de tipo dendrítico son características de sustratos esquistosos o pizarrosos. Sólo en casos en los que influencias estructurales condicionan parcialmente la red dendrítica o las bajas pendientes originan muy baja densidad de drenaje, se llega a hablar de redes subdendríticas, o parcialmente dendríticas.

Como casos de redes parciales dentro de cuencas, destacan las que parten de montes prominentes casi aislados, que generan en su alrededor una red radial. En otros casos, la antigua roturación del espacio ha necesitado de la modificación paulatina de los cauces hasta generar redes parcialmente artificiales, que podrían definirse de modo más apropiado como canales de tierra.

También se procedió a la identificación de los cauces principales de cada unidad de diagnóstico con objeto de calcular su sinuosidad (cuadro 6).

Cuadro 6. Índices de sinuosidad de los cauces principales.

<i>Cauce principal</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Long. Valle (km)</i>	<i>I. Sin. Hidráulica</i>
Salares	5,44	4,84	1,12 Rectilíneo
Sedella	5,07	4,41	1,15 Rectilíneo
La Morra	6,64	5,74	1,16 Rectilíneo
Almanchares	14,47	12,21	1,19 Rectilíneo
Cútar	8,51	7,11	1,20 Rect.-Trans.
Iznate	8,54	7,10	1,20 Transicional
Puente de Piedra	8,94	7,42	1,20 Transicional
Seco	10,04	8,19	1,23 Transicional
El Suque	11,23	8,93	1,26 Transicional
El Borge	8,75	6,95	1,26 Transicional
Guaro	38,78	29,27	1,32 Transicional
El Alcázar	6,99	5,25	1,33 Transicional
La Fuente	7,23	5,36	1,34 Transicional
Almáchar	5,65	3,95	1,43 Transicional
Mineral	7,06	4,91	1,44 Transicional
Las Cañas	7,88	5,45	1,45 Transicional
La Caldera	9,30	6,35	1,46 Transicional
Bermuza	13,92	9,49	1,47 Transicional
La Cueva	26,10	14,80	1,76 Irregular
Almáchar 7.º orden	15,36	12,66	1,21 Transicional
Robite	22,99	16,49	1,39 Transicional
Guaro 7.º orden	55,70	32,05	1,74 Irregular
Benamargosa 7.º orden	54,25	27,00	2,01 Irregular
Vélez 8.º orden	59,71	35,33	1,69 Regular
Benamargosa 8.º orden	56,95	29,05	1,96 Irregular
Vélez 9.º orden	68,39	43,12	1,59 Regular

Fuente: Senciales (1995). I. Sin. Hidráulica: Índice de sinuosidad hidráulica.

Dado que la relación ancho/profundidad es variable a lo largo de los cauces, para evaluar la sinuosidad se ha utilizado la clasificación de Schumm (1963), en lugar de la propuesta por Morisawa (1985).

Los cauces transicionales, de baja sinuosidad, no presentan condicionamientos estructurales ni orográficos destacables. Los cauces principales de tipo rectilíneo se caracterizan por desarrollarse en áreas de fuertes pendientes, salvo en el caso del arroyo de la Morra, que atraviesa un sustrato margoso de fácil excavado y de pendientes más suaves.

En cauces de trazado regular y, sobre todo, de tipo irregular de sexto y séptimo orden, interviene de modo decisivo la estructura, con lo que las redes de fallas vienen a condicionar cambios direccionales. También es habitual que en áreas de baja pendiente y litología esquistosa, la escasa energía del caudal se traduzca en dificultad para surcar el sustrato, lo que obliga a una considerable sinuosidad. Diferente es el origen de la alta sinuosidad de los cauces de 8.º y 9.º orden, trazados sobre la llanura de inundación, y con un origen claro en el divagar de las aguas sobre áreas de baja pendiente, llegando a trazados parciales anastomosados (especialmente en el río Benamargosa); es en estos mismos cauces en los que predominan trazados artificiales que tratan de frenar las avenidas o dirigirlos a salvo de áreas de cultivos.

Un último análisis tipológico se centró en identificar el material predominante del lecho de los cauces principales mediante trabajo de campo. Si bien los puntos de control seleccionados se caracterizan por la presencia de material heterométrico, es posible definir el material preferente: rocas, cantos rodados, guijarros, gravas, arenas, limos y arcillas, en función de la clasificación de Gregory & Walling (1973) (cuadro 7).

La presencia abundante de guijarros es significativa del material que puede llegar a acarrear el río esporádicamente. Más aún si están presentes materiales como rocas o cantos rodados de dimensiones similares (homométricos), lo que puede confirmar que los materiales del lecho del río han sido transportados en un largo recorrido. Por el contrario, aquellos lechos en los que la presencia de guijarros o material de mayor diámetro es escasa o nula (al menos en superficie) revelan la acción predominante de la deposición.

Hemos considerado significativos también dos hechos: la presencia de caudal y la presencia de roca viva (afloramiento del sustrato) en la sección del cauce. A lo largo de nuestras observaciones (1990-95), pese a la escasez de lluvias, y con ello de caudales, pudimos identificar aquellos cauces que rara vez llevan agua (y la escasa que llevan alguna vez es producto de retornos de regadíos) de los que, incluso en plena sequía, llevan caudal, aún exiguo.

Cuadro 7. Tipos de lechos de los cauces principales.

Cauce principal	Tipo de lecho							Tamaño predominante
	Roca	Cantos	Guijarros	Grava	Arena	Limo	Arcilla	
Puerta Piedra	X	X				X	X	Limos finos
La Morra				X	X	X	X	Arena fina
Bermuza			X		X	X	X	Arena fina
Sedella	X				X	X		Arena fina
Iznate				X	X	X		Arena fina
Mineral				X	X	X		Arena fina
Salares				X	X	X		Arena fina
Almáchar				X	X			Arena media
El Borge				X	X			Arena media
La Cueva			X	X	X	X		Arena media
Almanchares		X	X	X	X	X		Arena media
Guaro			X	X	X	X		Arena gruesa
Seco			X	X	X	X		Arena gruesa
La Caldera	X	X	X	X	X	X		Arena gruesa
El Alcázar				X	X	X		Grava fina
Las Cañas	X	X	X	X				Grava fina
El Suque		X	X	X	X			Grava media
Cútar			X	X	X	X		Grava gruesa
La Fuente	X	X	X				X	Guijarros (7-25 cm)
Almáchar			X	X	X	X	X	Arena fina
Benamargosa			X	X	X	X		Arena fina
Guaro			X	X	X			Arena media
Robite				X	X	X		Grava fina
Benamargosa			X	X	X	X	X	Arena gruesa
Vélez			X	X	X	X	X	Grava fina
Vélez				X	X	X	X	Limo fino

Fuente: Senciales (1995).

La presencia de materiales de grueso diámetro en ríos normalmente secos revela un comportamiento mucho más violento que el de aquéllos que mantienen un caudal superficial, cuyo contenido calcáreo (en la práctica totalidad de los ríos de la cuenca) suele consolidar las partículas gruesas del lecho y dificultan su acarreo por parte del caudal. Así, se identificaron los cauces con caudal estacional o semicontinuo a la hora de valorar el tipo de lecho.

La presencia de roca en la sección del cauce es un índice de la acción del río (Cooke & Doornkamp, 1990), pues arranca y transporta material en lugar de depositarlo. Si el margen rocoso aparece sólo en un lado puede indicar la ablación sólo en ese margen, mientras que puede generarse deposición en el contrario. Por último, la presencia de material deposicional en ambos márgenes señala un área de acumulación.

En ningún caso se localizó roca viva en el propio lecho en las secciones de control. La presencia de roca viva en los márgenes de los lechos se ha identificado en el punto de control, teniendo en cuenta si la roca viva está a ambos márgenes del lecho, en uno sólo o en ninguno (cuadro 8).

10. CONCLUSIONES

El hecho de que los tres tipos de caracteres cualitativos tratados en este capítulo sean indicativos de aspectos erosivos de la red de drenaje nos permite estudiarlos en conjunto y establecer una clasificación de la erosión hídrica en función de su magnitud.

Para ello se han asignado valores en función de la energía teórica que muestran estos aspectos cualitativos. La idea se ha basado en la valoración cualitativa que realiza Van Zuidam (1978) de diversos aspectos erosivos de parcelas de cultivo. Proponemos los siguientes valores, en los que las cifras más elevadas indican una mayor energía erosiva:

Tipología de la red:

Dendrítica y Retorcida: 1 Subdendrítica y Subparalela: 2 Angulada y paralela: 3

Sinuosidad del cauce:

Tortuoso e Irregular: 1 Regular y Transicional: 2 Rectilíneo: 3

Tipo de lecho:

Material fino (< 64 mm): 1 Con guijarros y cantos: 2 Guijarros y cantos sin caudal: 3

Con rocas y cantos rodados: 3 Rocas y cantos sin caudal: 4

Tipo de márgenes:

De acumulación: 1 Mixta: 2 Roca aflorante: 3

Esta clasificación permite dar una definición final del tipo de acción hídrica en función de valores cualitativos que se manifiestan tanto en la forma de la cuenca y su cauce principal, como en una sección de este cauce principal (superior a 6.º orden), próxima a su confluencia. Los resultados se exponen en el cuadro 8. En función de este cuadro, los resultados finales diferencian cuencas con potencial fuerza erosiva de sus cauces (acción de ablación y transporte) y cuencas en las que el proceso más habitual es la deposición.

Las cuencas más cercanas al mar aportaron los valores más bajos; quizá no tanto por los bajos desniveles (que superan los 500 m) como por una menor agresividad del clima en la franja costera respecto al interior montañoso. Las precipitaciones medias anuales más bajas y la ausencia de manantiales importantes en esta zona, convierten a los caudales en esporádicos; si

Cuadro 8. Valoración de la acción lineal en función de aspectos cualitativos.

<i>Red de drenaje</i>	<i>Tipología</i>	<i>Sinuosidad</i>	<i>Tipo de lecho</i>	<i>Márgenes</i>	<i>Valor Final</i>
Mineral	1	2	1	1	5
Izmate	1	3	1	1	6
Almáchar	1	2	1	2	6
El Borge	1	2	1	2	6
El Suque	1	2	2	2	7
La Cueva	2	1	2	2	7
Seco	2	2	2	1	7
El Alcázar	2	2	1	2	7
Las Cañas	1	2	3	2	8
Guaro	1	2	2	3	8
La Caldera	1	2	3	3	9
La Morra	2	3	1	3	9
Salares	2	3	1	3	9
Bermuza	3	2	1	3	9
Sedella	1	3	3	3	10
Cútar	2	3	3	2	10
La Fuente	2	2	3	3	10
Almanchares	3	3	2	3	11
Puente de Piedra	3	3	3	3	12
Benamargosa 7.º	1	1	2	1	5
Almáchar 7.º	1	2	2	1	6
Guaro 7.º	2	1	2	2	7
Robite 7.º	2	2	1	3	8
Benamargosa 8.º	1	1	2	1	5
Vélez 8.º	2	2	2	1	7
Vélez 9.º	1	2	1	1	5

Fuente: Senciales (1995).

a ello se le añade que la intensidad media de las precipitaciones también es baja, los acarreo de materiales son mucho menos frecuentes en las cuencas cercanas a la costa que en las situadas hacia el interior.

Por el contrario, algunas de las cuencas que parten de las sierras Tejeda y Almijara, así como la del río Cútar, al pie de Comares, muestran los mayores índices teóricos de actividad fluvial. En los casos de las cuencas de Puente de Piedra, Almanchares y La Fuente, éstas han de salvar fuertes desniveles; en el caso del río Sedella es una cuenca, como veremos, de suelo potencialmente muy erosionable y con pendientes relativamente acusadas. Por último, la cuenca del río Cútar genera un colector que es una auténtica rambla de dimensiones bastante amplias para la superficie que drena (17,78 km²); por lo que su origen puede ser causado tanto por la erosividad de las lluvias en su cabecera (Comares), como por la erosionabilidad de parte de su sustrato

(esquistos cubiertos de viñedos y filitas con fuertes pendientes). Muy cercanos a los valores de estas cuencas se encuentran los índices de Salares, Bermuza, La Morra y La Caldera.

En el caso del río El Alcázar, el hecho de localizarse el punto de control en un pequeño cono de deyección puede modificar en parte la apreciación cualitativa, puesto que, a nuestro juicio, la fuerza erosiva de dicho cauce puede ser mayor, especialmente si consideramos la reciente construcción de una escollera en este cauce para frenar la fuerza erosiva que alcanza esta corriente tras su unión con el arroyo Puente Piedra.

Las cuencas de 6.º orden que mayor superficie ocupan (ríos Guaro y La Cueva), muestran índices intermedios, dado que deben arrancar materiales en áreas rocosas, pero las mayores dimensiones condicionan una menor pendiente media del lecho, que además se traduce en una alta sinuosidad, y, con ello, una menor fuerza erosiva. Además, ambas cuencas atraviesan el área de bajas pendientes del Pasillo de Colmenar, donde la pérdida de pendiente media del cauce posibilita la deposición y pérdida de energía de los caudales.

Las redes de séptimo orden evidencian en los resultados las diferentes pendientes medias de sus cauces principales; de forma que el mínimo valor final se da en el río Benamargosa, cuenca de gran tamaño cuyo desnivel máximo es de 1.447 m. Pese a que el desnivel es menor en el río Almáchar (969 m), éste ha de salvarlo en un área bastante más reducida (35,3 km² frente a 232 km² en el río Benamargosa), con lo que su caudal puede adquirir una mayor energía, lo que se traduce en un índice final más elevado. Aunque el río Guaro es también de grandes dimensiones, ha de salvar el desnivel de S.^a Tejada, por una parte, y el de la S.^a del Jobo (1.637 m de cota máxima), por otra (en su cauce principal); con ello, la energía que pueden alcanzar sus caudales es importante. Pero es mayor, en función del índice obtenido, la que adquiere el río Robite, que ha de salvar el desnivel de S.^a Tejada en un recorrido menor que el del río Guaro.

Finalmente, las cuencas de mayor orden jerárquico, esto es, las de octavo orden y el lecho del tramo final del río Vélez (9.º orden), muestran una disminución de la energía erosiva de los caudales, al presentar lechos caracterizados por materiales finos o medios con áreas de deposición (terrazas).

La comparación de estos resultados con valores morfométricos e hidrológicos de otros análisis más amplios sobre la misma cuenca (Senciales, 1995) aporta diferencias necesarias de precisar. La valoración morfométrica señala como cuencas de menor actividad a las desarrolladas sobre todo en áreas de baja pendiente y sustrato margo-areniscoso, donde factores como

densidad de drenaje o relación de bifurcación inciden decisivamente. Pero se da la coincidencia de valorar como cuencas de alta actividad a las procedentes de Sierra Tejada, en las que las fuertes pendientes originan profundos barrancos con gran energía erosiva, sólo frenada, teóricamente, en los casos en los que existe una densa cubierta forestal. Así lo apuntan los valores resultantes de la aplicación de la USLE en algunas de estas cuencas (Perles, 1995; Senciales, 1995).

El empleo conjunto de variables climáticas, hidrológicas, de erosión y morfométricas para analizar aspectos erosivos de cuencas origina coincidencias parciales en los resultados respecto a la morfología. Pero, otras veces, el peso de variables climáticas, morfométricas o morfológicas, queda contrastado por una escasa energía teórica de los caudales, fundamentalmente a causa de actuaciones hidrológico-forestales (no hay extensas superficies de vegetación arbórea natural en este área) evidenciadas por la densidad arbórea. Ello da lugar a que los análisis relativos a la erosión de las laderas y al comportamiento hidrológico señalen una baja dinámica erosiva actual. Pero, las evidencias de la alta densidad de drenaje, la alta bifurcación y los cauces de trazado rectilíneo y con lecho de bloques, vienen a señalar lo contrario, hecho que, como hemos comprobado, coincide, además, con frecuentes errores al alza del cálculo de periodos de retorno de avenidas extraordinarias respecto a la realidad. Es decir, se trata de un hecho frecuente en cuencas de montaña con caudales máximos de difícil previsibilidad en los que la peligrosidad natural requiere estudios específicos más avanzados que la mera restauración forestal o que el cálculo de periodos de retorno de avenidas extraordinarias. Según creemos, la morfología de las cuencas tiene mucho que aportar en este sentido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cattuto, C., Vallario, A. & D'argenio, B.** (1970): Valutazione analitica quantitativa della gerarchizzazione e dello stadio evolutivo di due bacini idrici campione. *Boll. Soc. Natur. in Napoli*, vol. 79, pp. 175-187.
- Chorley, R.J. et al.**, (1969): *Introduction to Fluvial Processes*. Suffolk, Methuen., 218 pp.
- Clotet, N., Gallart, F. & Sala, M.^a** (1987): Los badlands: características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notes de Geografia Física, Núm. monogràfic 1: Mesura i experimentació en Geografia Física*. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, àrea de Geografia Física. Universitat de Barcelona, núms. 15-16, 1986-87, pp. 29-38.
- Conesa García, C.** (1992): Trazados de baja y alta sinuosidad en ríos españoles. *Papeles de Geografia*, núm. 18, Universidad de Murcia, pp. 9-29.
- Cooke R.U. & Doornkamp, J.C.** (1990): *Geomorphology in environmental management. A new introduction*. Clarendon Press-Oxford. Second edition. 410 pp.
- García Rosell, L. & Vega De Pedro, R.** (1980): Caracterización e índices paramétricos de la red de drenaje de Sierra Nevada (España Meridional). *Tecniterrae* 5-235.

- Gregory, K.J. & Walling, D.E.** (1973): *Drainage Basin. Form and Process: a geomorphological approach*. Londres, Edward Arnold, 458 pp.
- Jardí, M.** (1985): Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, vol. XIX, Barcelona, pp. 41-68.
- Knighton, D.** (1984): *Fluvial Forms and Processes*. Londres, Edward Arnold, 218 pp.
- López Bermúdez, F., Navarro Hervás, F., Romero Díaz, M.^aA., Conesa García, C., Castillo Sánchez, V., Martínez Fernández, J. & García Alarcón, C.** (1988): *Proyecto LUCDEME IV: Geometría de las cuencas fluviales: las redes de drenaje del Alto Guadalentín*. ICONA. Monografía 50 del Proyecto LUCDEME. Murcia, 225 pp.
- Morisawa, M.** (1985): *Rivers. Form and process*. Longman. Geomorphology texts. K. M. Clayton. Univ. of East Anglia. London and New York, 223 pp.
- Naudin, J.J. & Prud'homme, R.** (1971): Méthodes d'analyses morphologiques et morphostructurales d'interprétation des topographies et des batymétries dans les domaines continentaux et marins. *Bulletin de l'Institut de Geologie du Bassin d'Aquitaine*, pp. 111-144.
- Perles Roselló, M.^aJ.** (1992): Relaciones forma de la ladera, patrón de drenaje y litología. Cuenca del río de la Cueva (Málaga). *Actas 2.^a Reunión Nacional de Geomorfología*. Murcia, pp. 477-485.
- Perles Roselló, M.^aJ.** (1994): Comprobación de una propuesta para la estimación teórica del estado erosivo (cuenca del río Vélez, Málaga). *Actas 3.^a Reunión Nacional de Geomorfología*. Logroño, 1994, pp. 93-104.
- Perles Roselló, M.^aJ.** (1995): *El concepto de fragilidad erosiva. Propuesta metodológica para su evaluación*. Univ. de Málaga. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones Univ. Málaga. Microfichas.
- Romero Díaz, M.^aA.** (1987): *Formas y procesos hidrogeomorfológicos en las cuencas de los ríos Castril y Guardal (cabecera del Guadalquivir)*. Tesis Doctoral. Dpto. de G.^a Física, Univ. Murcia, II vol.
- Romero Díaz, M.^aA. & López Bermúdez, F.** (1987): Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*, Núm. 12, pp. 47-62.
- Romero Díaz, M.^aA. & López Bermúdez, F.** (1989): *Avenidas Fluviales e Inundaciones en la cuenca del Mediterráneo. Relación entre escorrentías superficiales y características físicas y ambientales en pequeñas cuencas fluviales (Alto Guadalquivir)*. Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante. Caja de Ahorros del Mediterráneo. Alicante, pp. 171-183.
- Sala, M.^a** (1980): Análisis morfométrico de una cuenca de tamaño medio. *Aportación española al XXIV Congreso Geográfico Internacional*, Tokio, 1980, pp. 269-285.
- Sala, M.^a** (1982): Datos cuantitativos de los procesos geomórficos fluviales actuales en la cuenca de la Riera de Fuirosos (Montnegre, Macizo Litoral Catalán). *Cuadernos de Investigación Geográfica, tomo VIII*. Colegio Universitario de La Rioja, Logroño, pp. 51-68.
- Sala, M.^a** (1985): Estudio y medición de la escorrentía superficial y la erosión en las vertientes de Santa Fe del Montseny. *Jornadas sobre bases ecológicas per la gestió ambiental*. Dip. de Barcelona, pp. 107-110.
- Sala, M.^a** (1986): Estudi sobre la dinàmica de l'aigua i el sediment en un vessant pissarec de la Castanya. *Jornades de Recerca Naturalista al Montseny*. Diputació de Barcelona, pp. 47-50.
- Sala, M.^a & Gay, R.** (1981): Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. *Notes de Geografía Física, núm. 4*. Departament de Geografia, Universitat de Barcelona. Barcelona. Març, 1981, pp. 41-65.

- Sánchez Fabre, M.** (1990): Caracterización morfométrica de la cuenca del río Ebrón (Prov. de Teruel y Rincón de Ademuz). *Actas I Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, pp. 509-520.
- Senciales González, J.M.^a** (1990): *Formas y procesos de erosión en la cuenca del río Almáchar. Aproximación a varios modelos de cuantificación*. Univ. de Málaga, Memoria de Licenciatura, inédito.
- Senciales González, J.M.^a** (1995): *La cuenca del río Vélez. Estudio Hidrográfico*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga. Servicio de Publicaciones Univ. Málaga. Microfichas.
- Senciales, J.M.^a & Ferre, E.** (1992): Análisis morfométrico del río Benamargosa. Provincia de Málaga. *Actas 2.^a Reunión Nacional de Geomorfología*. Murcia, pp. 365-375.
- Senciales, J.M.^a & Ferre, E.** (1993): La morfometría fluvial en el estudio de los estados erosivos del territorio. Aplicación a la cuenca del río Almáchar (prov. de Málaga), *Rev. Baética*, núm. 15. Univ. de Málaga, 1993, pp. 119-164.
- Selby, M.J.** (1985): *Earth's Changing Surface. An introduction to geomorphology*. Charendon press. Oxford.
- Strahler, A.N.** (1964): Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Section 4-II of *Handbooks of Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- Strahler, A.N.** (1965): *Geografía Física*. Ed. Omega, Barcelona, 1986, 767 pp.
- Van Zuidam, R.A. & Van Zuidam Cancelado, F.I.** (1978): *Terrain analysis and classification using aerial photographs. A geomorphological approach*. ITC Textbook of Photo-Interpretation. VII-6. Enschede, The Netherlands, 340 pp.