

Indicadores de resiliencia, evaluación y criterios para la gestión y restauración

Carmelo Conesa García, Alfredo Ollero, Askoa Ibisate, María Rosario Vidal-Abarca, María Luisa Suárez, Pedro Pérez Cutillas, Rafael García Lorenzo, Valeria Pirchi, Yilena Hermoso, Sergio Sanmartín y Alberto Martínez Salvador

3.1. Indicadores de resiliencia geomorfológica y ecológica en cursos efímeros

Se entiende por resiliencia la capacidad de un sistema para absorber posibles alteraciones y reorganizarse, mientras se somete a cambios para mantener esencialmente la misma función, estructura, identidad y retroalimentación (Walker et al. 2004). Se puede superar un umbral de estabilidad geomorfológica de un cauce efímero frente a alteraciones intrínsecas al mismo o variables externas (Schumm, 1979). Normalmente este tipo de resiliencia va acompañado de la resistencia o dificultad que los cursos efímeros oponen ante la modificación de una situación de equilibrio geomórfico por causa de procesos naturales o acciones antrópicas (Thoms et al. 2018). En general, todos los tipos de equilibrio referidos a sistemas geomorfológicos fluviales pueden aplicarse a los ríos intermitentes y cursos efímeros (IRES), teniendo en cuenta las peculiaridades de su funcionamiento, irregular y discreto en el tiempo, a través de sucesos hidrológicos concretos de diferente magnitud: 1) equilibrio estático, cuando un equilibrio de tendencias da como resultado una condición estática, un estado sin cambios; 2) equilibrio estable, caracterizado por la tendencia de un sistema a moverse hacia una condición de equilibrio anterior, es decir, a recuperarse después de haber sido alterado por factores externos; 3) equilibrio inestable, donde una pequeña alteración conduce a un cambio mayor y, por lo general, al logro de un nuevo equilibrio estable; 4) equilibrio metaestable, cuando el sistema permanece relativamente estable durante un largo período de tiempo, a pesar de sufrir leves alteraciones que tienden a modificarlo; 5) equilibrio en estado estacionario, en el que las propiedades del sistema son invariantes a una escala de tiempo dada, pero puede oscilar alrededor de un estado medio debido a la presencia de variables que interactúan entre sí; 6) equilibrio dinámico, considerado como un estado de distribución de energía al que siempre se llega rápidamente en respuesta a un equilibrio energético cambiante (Leopold y Langbein, 1962). En este caso, las fluctuaciones producidas dentro de

un rango de situaciones de equilibrio, en relación con una condición del sistema en constante cambio, pueden tener una trayectoria de estados no repetidos con el tiempo (Thorn y Welford, 1994).

La morfología de los IRES, y en particular de los cursos efímeros específicos de áreas semiáridas (SAES), refleja la influencia de variables muy diversas que operan a múltiples escalas (Schumm, 1998). Ante condiciones topográficas y litológicas similares, la más importante de ellas es el régimen climático predominante, que condiciona sensiblemente el desarrollo de la cubierta vegetal y de los tipos de suelos, y sobre todo la magnitud y variabilidad de los caudales de avenida. Tales variables intervienen de forma combinada, determinando otras variables directamente implicadas en la conformación del propio cauce: suministro y transporte de sedimentos, textura de los materiales del lecho y márgenes, y balance entre erosión y sedimentación. Todas ellas interactúan a distinta escala espacial y temporal, afectando continuamente al modelo de cauce en planta, a la forma de la sección transversal de éste, a los procesos de incisión y acreción vertical del lecho, a la pendiente y perfil de equilibrio y a la dinámica morfológica del lecho. En la medida que dichas escalas y variables participan en la dinámica propia de estos sistemas, también pueden utilizarse como indicadores geomórficos de la capacidad de resistencia y recuperación de una situación de equilibrio previa.

Sensibilidad y resistencia geomorfológica

Los cursos efímeros son particularmente sensibles a las alteraciones humanas directas (por ejemplo, a la construcción de presas, escolleras, canalizaciones, etc.) (Surian y Rinaldi, 2003; Conesa-García y Pérez Cutillas, 2014; Dufour et al., 2015), pero presentan una extraordinaria variabilidad en su resistencia a cambios ambientales paulatinos o progresivos (por ejemplo, al cambio progresivo del clima o de la cubierta vegetal). Calle et al. (2017) y Sanchis-Ibor et al. (2017) comprobaron en sus respectivos estudios de las ramblas de la Viuda y del Palancia que ambos cursos efímeros mostraron una alta sensibilidad geomorfológica ante los efectos inmediatos de las extracciones de áridos en la carga de sedimentos de avenidas importantes, una apreciable resistencia en condiciones previas de mayor estabilidad y una recuperación posterior algo más lenta. Los cauces efímeros mediterráneos han estado sometidos durante más de dos mil años a actuaciones que han hecho cambiar su grado de ajuste, dependiendo de la magnitud de la intervención, de las características preexistentes y del ritmo de ocurrencia de sucesos hidrológicos extremos.

Los SAES son dueños de su propia eficiencia hidráulica cuando discurren por terrenos aluviales, en los que muestran formas de cauce abierto y poco profundo, desde el tipo artesa hasta amplias secciones someras, que terminan difuminándose en la llanura. En estos entornos, la resistencia resulta del efecto combinado de la forma

en planta del cauce, la geometría del cauce, el tamaño/configuración del material del lecho, y la densidad y tipo de cubierta vegetal en el cauce principal y lecho activo de inundación (Fryirs y Brierley, 2013). En cambio, la sensibilidad del cauce en un tramo refleja la facilidad con la que éste puede realizar el ajuste (es decir, el modo en que el tramo tiende a ajustar su forma para resistir el cambio) y la proximidad a las condiciones de umbral crítico:

$$\textit{sensibilidad} = \textit{capacidad de ajuste} + \textit{proximidad a un umbral crítico}$$

Por lo general, las ramblas suelen ser bastante sensibles a las alteraciones y pueden adaptarse fácilmente a ellas como parte de su capacidad natural de adaptación, pero son sistemas geomórficos propensos a cambios drásticos si se traspasan umbrales importantes (por ejemplo, avenidas extremas torrenciales). Su recuperación rara vez refleja un proceso ordenado, progresivo y sistemático. Los componentes de este tipo de sistema se ajustan de diferentes maneras y a tasas variables, de modo que los tramos individuales experimentan transiciones entre diferentes estados en diferentes momentos (Fryirs y Brierley, 2013). No obstante, cuando la aproximación a dicho umbral crítico se produce de forma más lenta y progresiva (por ejemplo, trayectoria inmersa en un proceso de cambio climático) los tramos más resistentes de las SAES, en particular los de lecho de grava, muestran un comportamiento más resiliente, siendo capaces de responder al cambio mediante ajustes que operan como mecanismos de retroalimentación negativa. En este escenario, la estabilidad se mantiene a medio y largo plazo debido a la naturaleza autorreguladora del sistema, que tiende a absorber gran parte del impacto externo.

Indicadores de resiliencia geomorfológica

Perfil de equilibrio

Los cambios de caudal (Q_w) aguas abajo influyen en la curvatura del perfil longitudinal del canal. La ecuación de Wolman y Leopold (1960) para la condición de equilibrio de un cauce bankfull establece que los incrementos de Q_w contribuyen a los perfiles cóncavos (Leopold y Maddock, 1953; Sinha y Parker, 1996), mientras que las reducciones aguas abajo en Q_w contribuyen a la convexidad del canal. En este sentido, los cursos efímeros comúnmente muestran una notoria reducción de Q_w a lo largo de su trayecto (Martín-Vide et al., 1999; Bull, 2007), a menudo asociado con un perfil rectilíneo (Powell et al., 2012; Ferrer-Boix, 2016) o ligeramente convexo (Heede, 2004). La disminución del caudal aguas abajo en este tipo de cursos se halla en muchos casos relacionada con las altas tasas de permeabilidad que presentan sus lechos granulares, especialmente los de arenas y gravas. El resultado es una pendiente constante en gran parte del perfil.

Pendiente de equilibrio

Se entiende por pendiente de equilibrio en un IRES aquella que equilibra los caudales líquidos y sólidos atribuibles a los sucesos de avenida ocurridos durante un periodo dado. También puede considerarse a la pendiente como la variable que consigue restablecer un equilibrio perdido (Martín Vide, 1997). Procesos de erosión regresiva o progresiva, provocados por acciones directas en el lecho, tienden a disminuir la pendiente si se mantiene aguas abajo un nivel de base fijo o estable, hasta recuperar la pendiente inicial del lecho y alcanzar de nuevo el estado de equilibrio previo (como se observa en la figura 100). Este es el caso del rebajamiento del lecho causado por extracciones de áridos en la rambla de Béjar, que provocó asimismo aguas abajo un reajuste de la pendiente y el desmantelamiento de las zapatas de los pilares que sustentaban el puente de la autovía A7 a su paso por dicha rambla. Por el contrario, un incremento de la deposición bajo las mismas condiciones puede aumentar la pendiente del tramo afectado.



Figura 100. Erosión regresiva producida por un cambio del nivel de base local en la Rambla Salada, afluente del río Segura por su margen derecha. El desnivel del lecho tenderá a suavizarse conforme la erosión vaya remontando en dirección aguas arriba hasta alcanzar el equilibrio del fondo, momento en el que el lecho recuperará su estabilidad y una nueva pendiente de equilibrio.

Lecho de equilibrio

Puede considerarse que el lecho de un curso efímero está en equilibrio cuando, tras una avenida, mantiene su misma cota de elevación, independientemente de la magnitud de su caudal y transporte de sedimentos. En dicho equilibrio intervienen variables muy diversas, entre las que Lane (1955) destaca el caudal de agua unitario, el caudal sólido unitario de fondo, la pendiente longitudinal y el tamaño predominante de los sedimentos. Cualquier cambio que afecte a una o varias de estas variables en un suceso determinado supone una alteración del equilibrio preexistente, haciendo necesario un efecto compensatorio en sucesos posteriores. Cuando el caudal líquido y la carga de fondo no se hallan en equilibrio en una avenida determinada el IRES puede experimentar un déficit en el transporte de sedimentos de fondo o por el contrario un exceso. En el primer caso, la erosión transitoria no suele ser compensada por la deposición y ello conlleva la incisión del lecho. En el segundo, el cauce sufre una sobrealimentación y acreción sedimentaria vertical. Dicho equilibrio depende también de la pendiente del cauce y del tamaño de las partículas transportadas. El balance positivo o negativo entre caudal sólido y líquido puede ser equilibrado en el transcurso de varios sucesos por una adaptación de la pendiente longitudinal y del tamaño característico del sedimento. De esta forma, es muy frecuente observar que los tramos altos de ramblas y rieras, dotados de una mayor pendiente, muestran los lechos de textura más gruesa, y viceversa, los tramos inferiores tienen menor pendiente y material más fino.

Relación entre DMR y competencia de las corrientes de avenida

Las ratios morfológicas adimensionales (DMR) del cauce pueden constituir otro indicador de resiliencia en los SAES si se relacionan con el balance entre energía de la corriente y energía crítica a escala de suceso. Normalmente han sido aplicadas en sistemas de clasificación de cursos de agua y proyectos de restauración fluvial, pero también reflejan la tendencia de los ajustes morfológicos dentro de una escala temporal. Dependiendo de dichas ratios y de la dinámica actual del SAES puede inferirse si la tendencia observada en él puede ser frenada, e incluso revertida, o, por el contrario, se mantiene firme en la búsqueda de un nuevo equilibrio.

Los cursos efímeros tienen dinámicas extraordinarias que están fuertemente condicionadas por cambios en el clima, la cobertura del suelo y los impactos humanos. La variabilidad en las proporciones morfológicas adimensionales (DMR) se puede utilizar como un indicador apropiado de este dinamismo a diferentes escalas, tanto temporal como espacialmente. Comúnmente se asume que los cambios en las ratios de anchura-profundidad (WDR) y de incisión (IR) a menudo corresponden a acciones humanas. Sin embargo, en algunos casos, el índice de encajamiento (ER) refleja una desconexión con el llano aluvial anterior al asentamiento humano, que implica un proceso de ajuste a largo plazo.

Ratio anchura-profundidad del cauce (WDR). Esta ratio, obtenida al dividir la anchura total del cauce bankfull por la profundidad promedio del mismo, suele reflejar la magnitud del flujo y de la carga de sedimentos a lo largo del tiempo (WSDNR, 2004; Rosgen, 1996). Por tanto, en nuestro caso, constituye un indicador útil para expresar la competencia de la corriente y la capacidad de transporte durante los caudales de avenida responsables de la forma de cauce activo actual. En otros estudios, el WDR también se ha considerado una función de la textura del sedimento dominante en el perímetro del cauce (Schumm, 1960; Richards, 1982) y las condiciones de los límites (restricciones geológicas, valle inclinado, sustrato del lecho y vegetación ribereña) que controlan la forma de un tramo determinado (Charlton, 2008). En tales condiciones, el WDR se ajusta por el balance entre erosión y sedimentación dentro del cauce, lo que provoca la acumulación o degradación del lecho y el desplazamiento de los márgenes (Simon y Castro, 2003).

Ratio de encajamiento (ER). Este indicador, o ratio entre la anchura del área potencial de inundación y la anchura total bankfull, representa en el caso de los IRES la contención vertical del cauce principal y la capacidad de su llano activo de inundación para laminar los caudales de avenida. Según Rosgen (1997), durante las inundaciones, los tramos muy encajados pueden contener todo el flujo dentro del propio cauce y no derramarse sobre la llanura aluvial. En tramos moderadamente encajados, las aguas altas extraordinarias pueden cubrir gran parte del área propensa a inundaciones, mientras que los tramos fluviales que muestran escaso o nulo encajamiento conectan su llanura aluvial directamente con los flujos altos ordinarios. Las SAES, y en particular los cursos efímeros costeros de corto recorrido y lechos de gravas, suelen presentar tramos representativos de las tres modalidades: encajados en cabecera, a menudo en formaciones de abanicos aluviales, encajamiento moderado en el tramo medio con forma del cauce en artesa y fondo plano y zona de derrame no encajada en torno a la desembocadura. Los valores de ER pueden atribuirse a muchos factores, incluidas las variaciones climáticas, el rebajamiento tectónico local del nivel de base y los impactos humanos (Bull, 1997), siendo la causa más inmediata el aumento de la erosión provocado por un incremento de caudal y radio hidráulico en secciones con materiales de baja resistencia mecánica a la erosión.

Ratio de incisión (IR). La IR, definida como la relación entre de altura del margen más bajo y la profundidad máxima bankfull (Rosgen, 1996), es un indicador geomórfico más sensible de la degradación actual y reciente del lecho que ER. Como la llanura de inundación es más ancha que el cauce bankfull, se requiere una incisión y un caudal formativo mayores para producir cambios significativos en ER. Cualquier cambio en ER generalmente implica cambios más sustanciales en IR y estará sujeto a cambios de inundación con tiempos de retorno más largos (inundaciones ≥ 50 años). Una ratio de incisión próxima a 1 indica estabilidad del lecho durante las últimas fases de formación del cauce bankfull. Por el contrario, los valores de IR superiores a 1 reflejan procesos recientes de reducción o degradación del lecho, que pueden ser relevantes ($1,5 < IR < 2$) y muy intensos ($IR > 2$).

Las DMR combinadas con el trazado del cauce y el balance energético de la corriente a escala de suceso pueden proporcionar una información más adecuada para determinar la resiliencia y grado de ajuste morfológico de los SAES. Conesa-García et al. (2019) adoptaron este criterio en el Alto Mula (cuenca del Segura) para identificar tramos con diferente grado de resistencia y sensibilidad. Estos autores calcularon el excedente medio de energía de la corriente (ϵ) como la energía media de la corriente (ω) menos la energía crítica (ω_c), asociada a la pendiente y al tamaño de las partículas del lecho (Parker et al., 2011). En concreto, comprobaron que los ajustes morfológicos menores se produjeron durante sucesos de baja energía (valores ϵ inferiores a 30 W m^{-2}) en secciones transversales moderadamente incididas con encajamiento incipiente o nulo y WDR moderada a lo largo de tramos de curva (BS), y en secciones transversales muy incididas y encajadas con WDR moderada a alta a lo largo de tramos de cauce rectilíneos (SS). En cambio, los tramos rectilíneos o poco sinuosos, de lecho granular, poco encajados, pero sometidos a una fuerte incisión actual, se mostraron más sensibles en condiciones de energía similares, y anotaron los cambios más significativos en grandes avenidas (flash floods) durante las que se superó el umbral ϵ de 250 W m^{-2} .

La consideración adicional del índice de estabilidad relativa del lecho (RBS) como criterio de estabilidad, permitió observar en este caso dos patrones ω con estadísticos muy diferentes para lechos estables e inestables, independientemente del grado de incisión: (1) un patrón de lechos granulares inestables ($\text{RBS} < 1$) cuya mediana ω se sitúa en torno a 150 W m^{-2} , con $\sigma > 50 \text{ W m}^{-2}$; y (2) un patrón de lecho relativamente estable, cuya mediana ω y σ disminuyen a medida que aumenta el grado de estabilidad. Además, pudieron constatarse patrones relacionados con la magnitud del rango de $35\text{-}300 \text{ W m}^{-2}$ acordes con las ratios de incisión. En los sub-tramos menos incididos, pero con formas de lecho más inestables, la mediana ω dentro de este rango fue mucho más baja que la estimada en condiciones de mayor estabilidad morfológica (Conesa-García et al., 2019).

La capacidad de un tramo de cauce efímero para absorber (resistir y recuperarse) alteraciones está relacionada con umbrales geomórficos en sucesos de avenidas discretos en el tiempo. Los cambios en un cauce ocurren cuando se exceden los umbrales relacionados con la energía de la corriente o el régimen de flujo y de sedimentos (Schumm 1979). La morfología de un determinado tramo es susceptible de cambio (por tanto, sensible al cambio) cuando está próxima a un umbral geomórfico crítico impuesto por una perturbación (Brewer y Lewin 1998; Schumm, 1969, 1979). En tal situación, la resistencia al cambio es baja y se produce un ajuste del cauce acorde con la magnitud de la alteración. La recuperación puede ser lenta o rápida, a través de la adaptación de las distintas unidades morfológicas que conforman el cauce (Fryirs y Brierley, 2013) y de la colonización y desarrollo de la vegetación (Dollar et al. 2007). El umbral de energía de la corriente para la estabilidad en el tramo efímero inferior del Alto Mula difirió del sugerido por otros investigadores para las corrientes peren-

nes con lecho de grava. En particular, las secciones transversales con lecho más estable ($RBS < 1$) y caudal bankfull el valor mínimo ω requerido para la degradación del lecho excedió los 80 W m^{-2} .

En condiciones de mayor competencia de flujo ($1 < RBS < 2$), este valor varió de 33 W m^{-2} en tramos de cauce moderadamente incidido ($1 < IR < 2$) a 42 W m^{-2} en tramos de alta incisión ($IR > 2$). El umbral de 300 W m^{-2} , sugerido por Magilligan (1992) para importantes ajustes morfológicos con erosión, fue superado en el 16% de los casos, aunque alrededor de un tercio de ese porcentaje se produjo en secciones con un lecho muy estable. Estos lechos estables generalmente se caracterizan por afloramientos locales de sustrato rocoso o están compuestos por guijarros y bloques gruesos que se movilizan solo en eventos grandes. En estos casos, se observó una clara influencia del acorazamiento del lecho en la estabilidad del cauce, en concordancia con el comportamiento de cauces efímeros con alternancia de lecho granular aluvial y sustrato cohesivo (Wittenberg et al., 2007; Conesa-García et al., 2007). Estos resultados parecen confirmar la existencia de ajustes morfológicos actuales (una desaceleración de los procesos de socavación al aumentar el acorazamiento del lecho y el ensanchamiento del cauce) diferentes de los desarrollados en una etapa anterior que fueron responsables de la incisión profunda y el encajamiento (Conesa-García et al., 2020a). Tales resultados fueron consistentes con los obtenidos al relacionar la ratio de energía media de la corriente (ω) vs energía crítica de resistencia (ω_c) (ω/ω_c) y el gradiente medio de energía ($\partial\omega/\partial s$) para diferentes rangos de DMR en cada clase de tramo. Las secciones transversales con valores moderados de incisión y W/D , y encajamiento insignificante o nulo, a lo largo de los sub-tramos curvos, fueron frecuentemente objeto de caudales bankfull con una capacidad de transporte de sedimentos baja a moderada, que produjeron estabilidad del lecho y ajustes morfológicos menores. Los valores de balance energético más altos mostraron una mayor dispersión y correspondieron a secciones transversales menos encajadas e incididas con tendencia a un ensanchamiento del cauce. Resultados similares obtuvieron Yochum et al. (2017) al constatar una mayor respuesta y ajuste morfológico en cauces no confinados de acuerdo con el incremento de la energía de flujo unitario (ω).

Umbral de energía y ajustes morfológicos

En particular, la variabilidad morfológica espacial y temporal en SAES, como una función de las variaciones en la energía de las aguas de avenida, ha sido poco estudiada (Levick et al., 2008; Ortega et al., 2014). Sutfin et al. (2014) propusieron una ordenación de escala multidimensional no métrica, basada en variables geométricas e hidráulicas: relación anchura-profundidad (W/D), gradiente de la lámina de agua (S), energía de la corriente (Ω) y tensión de corte (τ). Otros autores relacionaron los ajustes morfológicos en este tipo de cursos efímeros con cambios sistemáticos en la ratio energía media de la corriente (ω)/energía crítica de resistencia (ω_c) (ω/ω_c) (Bull, 1997) y, por tanto, en la eficiencia de transporte, asociada con el gradiente medio de energía de la corriente ($\partial\omega/\partial s$)

y el exceso de energía (Conesa-García et al., 2020a). Recientemente, en el marco del proyecto CCAMICEM, Conesa-García et al. (2020b, 2021) han propuesto un enfoque metodológico para evaluar, a escala de eventos, las relaciones entre los flujos de sedimentos y la energía de las aguas de avenida a lo largo de un cauce efímero de gravas (Rambla de la Azohía, Murcia), combinando Modelos Digitales de Muy Alta Resolución (VHRDTM), proporcionados por SfM-MVS y TLS, y un modelo hidrodinámico 1D calibrado mediante información de campo. Entre los resultados obtenidos destacan los siguientes:

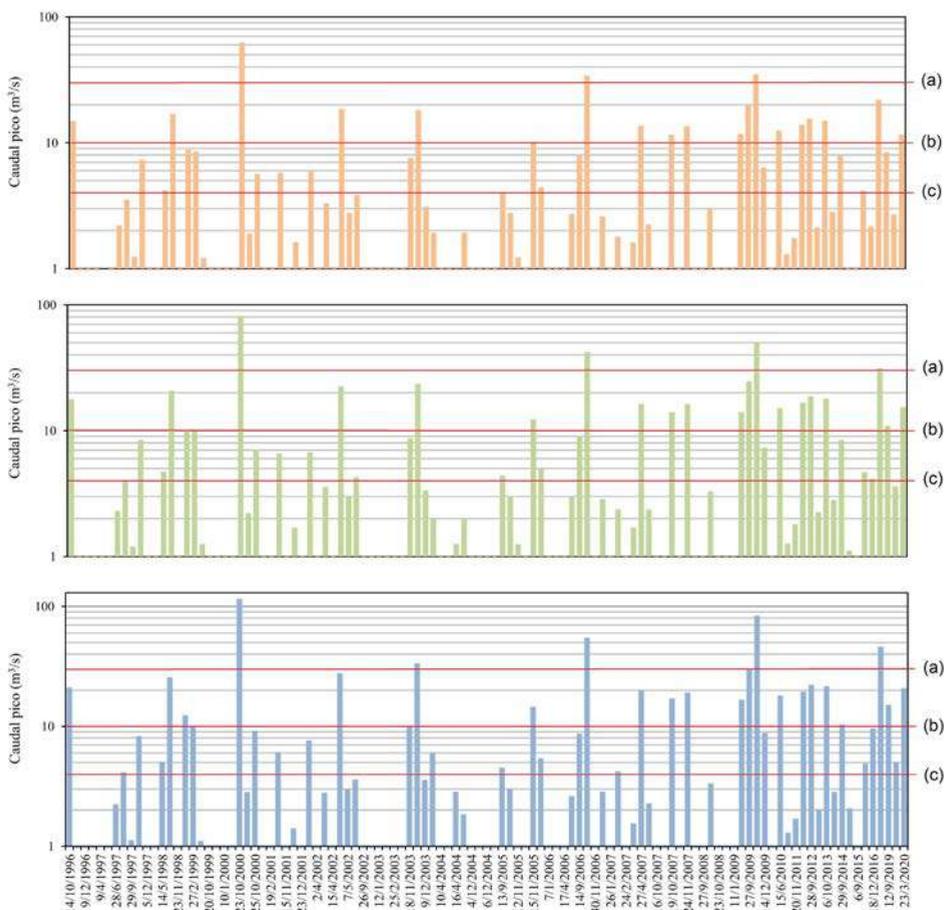


Figura 101. Umbrales de caudales pico asociados a diferentes clases de ajustes morfológicos durante las avenidas simuladas con GeoWEPP para los tramos alto, medio y bajo de la Rambla de la Azohía (período 1996-2020): (a) cambios morfológicos mayores, que afectan a la totalidad del cauce (nivel bankfull y lecho activo de inundación); (b) cambios moderados (formas locales de incisión y acreción vertical del lecho, y socavado basal del margen); (c) ajustes menores limitados al lavado superficial del lecho por transporte selectivo y pequeñas variaciones en las formas del lecho activo. Fuente: Proyecto CCAMICEM (2018-2021).

Los eventos mayores, con caudales pico superiores a $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, registraron los valores más altos de energía de la corriente ($\omega > 300 \text{ Wm}^{-2}$) (figura 101) y una gran variabilidad espacial tanto en el gradiente medio de energía ($\sigma > 6 \text{ Wm}^{-2}/\text{m}$) como en el exceso de energía ($\sigma > 80 \text{ Wm}^{-2}$). Estos flujos movilizaron una gran cantidad de carga de lecho, lo que provocó una notable erosión transitoria y una acumulación vertical general. Específicamente, se comprobó que los caudales que exceden el caudal bankfull total tienden a producir acreción sedimentaria vertical (0,20 a 0,35 m para un caudal punta de $31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), después de haber movilizadado una gran cantidad de carga de lecho aguas arriba. Durante este proceso se produjeron grandes variaciones en el gradiente de energía de la corriente ($-15 < \partial\omega/\partial s < 15 \text{ Wm}^{-2}/\text{m}$) y un alto excedente medio de energía (ratios ω/ω_c medias > 2 para el mismo evento). Por el contrario, los valores de ω de 35 a 150 Wm^{-2} se asociaron a la eliminación de depósitos de margen y cambios moderados en las barras bajas activas (figura 101). La degradación del lecho dominó especialmente en las zonas laterales, debido a la rotura de taludes y al desplazamiento de las barras de grava intermedias. Por el contrario, los caudales pico moderados ($10\text{-}20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), en las etapas subbankfull, produjeron principalmente procesos de lavado superficial, transporte selectivo, socavación basal y destrucción parcial de barras bajas activas.

La dinámica morfosedimentaria como indicador de resiliencia geomorfológica

El grado de mantenimiento o recuperación de un tipo de cauce puede abordarse como un indicador de resiliencia a nivel de cuenca (Fryirs y Brierley, 2013). Sin embargo, a escala de tramo, los cambios en la disposición, interconexión y composición de las geoformas del lecho (por ejemplo barras, rápidos, pozas y sectores interbarras) y los cambios en la textura de los materiales del lecho en respuesta a alteraciones del sistema fluvial suelen estar más relacionados con la distribución granulométrica inicial del sedimento, las variaciones espacio-temporales de la carga de fondo y la morfología del cauce (Thorp et al., 2006; Poole 2010; Elosegi y Sabater 2013; Conesa-García et al., 2020b). A ambas escalas, formas del lecho y naturaleza del sustrato, el concepto de resiliencia alcanza una mayor importancia y aplicabilidad ecogeomorfológica. Así lo han reconocido diversos autores al destacar que dichos ámbitos representan un hábitat físico crítico para la biota y los ecosistemas ripícolas (Fuller et al., 2019), al tiempo que influyen de forma integrada y decisiva en la respuesta global del cauce a alteraciones del mismo dentro de un equilibrio dinámico (Fryirs y Brierley, 2013). El comportamiento diferencial de estas formas de lecho, a su vez altamente cambiantes en los cauces efímeros, implica una resiliencia mixta, capaz de “absorber” gran parte de la perturbación sin un cambio sustancial en la forma general del cauce.

En función de su actividad y ritmo de ajuste dentro de los cauces efímeros pueden coexistir formas de lecho muy diferentes, desde barras activas, carentes de vegetación, y extremadamente cambiantes, hasta zonas de sustrato rocoso cohesivo y ba-

rras altas aluviales fitoestabilizadas. Las barras sumergidas de forma esporádica por avenidas de magnitud moderada y alta suelen aparecer comúnmente colonizadas por asociaciones vegetales características, con predominio de matorrales y arbustos, que reflejan dichas condiciones hidrológicas y la naturaleza de los materiales granulares sobre los que se asientan. La combinación de procesos erosivos y de deposición, que favorecen, amortiguan o impiden su desarrollo determinan la respuesta potencial de cada unidad morfosedimentaria en particular. Bajo dicho criterio, se pueden inferir relaciones de magnitud-frecuencia de formación y reelaboración de tales unidades. La densidad y tipo de vegetación observados sobre cada forma permitirán detectar su grado de sensibilidad/resiliencia frente a alteraciones del régimen hidrológico o cambios en la energía media de la corriente en sucesos extremos. Cada vez son más numerosos los estudios (Calle et al., 2017; Conesa-García et al. 2020b; Ibisate et al., 2021, entre otros muchos), que analizan este tipo de relaciones entre formas de lecho, vegetación y capacidad de ajuste (sensibilidad para sufrir alteraciones: conexión de unas barras con otras, acreción vertical o lateral de las mismas por un incremento en la deposición; o reelaboración parcial, desagregación y destrucción de una unidad geomórfica por erosión).

La mayoría de los SAES discurren por formaciones aluviales (glacis, abanicos y llanos aluviales) con un trayecto parcialmente confinado, que puede condicionar lo-



Figura 102. Tramo bajo de la Rambla de las Moreras con lecho de gravas y cantos, fuerte carga de fondo y erosión lateral. Rambla litoral murciana dotada de una importante fuente de sedimentos gruesos en terrenos metamórficos de cabecera.

calmente su capacidad de ajuste. La presencia de sustrato rocoso en determinados tramos limita el ajuste lateral y vertical del cauce. Sin embargo, lo más frecuente en medios áridos y semiáridos es la presencia de lechos granulares con alto grado de acorazamiento y márgenes de material detrítico poco cohesivo, que, dependiendo de la pendiente del tramo, conforma cauces poco sinuosos anchos y poco profundos (Schumm, 1961; Scott, 2006) (figura 102). Este acorazamiento del lecho se debe generalmente a un alto suministro de sedimentos de todos los tamaños, la rápida recesión de los hidrogramas de avenidas repentinas y los períodos prolongados sin flujo (Reid y Laronne, 1995). También puede contribuir al ensanchamiento del cauce en largos tramos de SAES la escasa o nula presencia de cubierta vegetal en los márgenes (Reid y Frostick, 1997).

La distribución de las unidades geomorfológicas está muy influida por la pendiente local del lecho. En tramos altos, de cabecera (por ejemplo, encajados en abanicos aluviales), las aguas de avenida desarrollan una alta energía y la pendiente juega un papel importante determinando el grado de ajuste y resistencia de las formas del lecho en función de su proximidad al umbral de recuperación del perfil longitudinal previo. Suele tratarse de cauces rectos o poco sinuosos, estrechos y relativamente profundos, donde los procesos de incisión vertical predominan sobre los de erosión lateral. Estas condiciones limitan la capacidad del cauce para ajustarse lateralmente de modo que la gama de las formas de lecho resulta también muy limitada.

En cambio, los tramos bajos, de escasa pendiente, lateralmente no confinados, y por tanto normalmente sometidos a corrientes esporádicas de baja energía, presentan un mayor desarrollo lateral siendo, sensibles a ajustes laterales y a variaciones en la forma y grado de conexión de los depósitos. En estos casos las condiciones de baja energía facilitan la disipación de las aguas de avenida y la acreción sedimentaria, mediante la sucesión de depósitos con secuencias sedimentarias de tendencia granodreciente. Estos tramos, moderadamente resistentes, tienen una capacidad de ajuste localizada. La cubierta vegetal suele colonizarlos con mayor facilidad e incrementar su resistencia al cambio, sobre todo en las barras más estables. Los tramos medios, caracterizados por una mayor movilización de la carga sedimentaria y variaciones más frecuentes en la cota del lecho, son propensos a ajustes verticales, laterales y globales, y por tanto muy sensibles.

Indicadores de resiliencia ecológica

Los cauces efímeros albergan una amplia variedad de ecosistemas. De hecho, incluyen tanto los propios de cauces estrechos sobre lechos de rocas y de fuertes pendientes como los presentes en cauces muy amplios sobre lecho de arena y escasa pendiente, pasando por aquellos otros establecidos en lechos de gravas. La configuración de esta compleja tipología está marcada por el ámbito topográfico, geológico y climá-

tico en el que se desarrollan. Así, los cursos efímeros de cauces estrechos y sustrato duro se localizan en áreas montañosas de rocas duras, mientras que los cauces más anchos se desarrollan en zonas llanas sobre sustratos más blandos y deleznable. Todos ellos tienen en común la ausencia de agua durante la práctica totalidad de la duración del ciclo hidrológico anual (Vidal-Abarca et al., 2020), aunque son los eventos de avenidas de agua esporádicas los que, finalmente, configuran su morfología.

En la actualidad se está iniciando una línea de trabajo a nivel mundial que pretende analizar las comunidades biológicas que viven en estos ecosistemas y su capacidad de resistencia y/o resiliencia (Steward et al., 2011; 2017; Sánchez-Montoya et al., 2016; 2017; 2019), cuáles son los procesos ecológicos que los rigen (Merbt et al., 2016; Arce et al., 2019; Marcé et al., 2019; Von Schiller et al., 2019; Keller et al., 2020) y cuánto y cómo contribuyen al bienestar humano (Nicolás et al., *in press*). El nivel de conocimiento sobre estos aspectos es aún muy incipiente; sin embargo, es posible hacer algunas consideraciones interesantes, con perspectiva de futuro.

En términos generales, las especies que habitan los cauces efímeros deben ser resistentes o resilientes a las avenidas esporádicas, pero sobre todo a las condiciones ambientales impuestas por este hábitat (alta insolación, alta fluctuación de la temperatura ambiental; falta de agua y humedad, etc.).

No todos los cauces efímeros albergan una comunidad vegetal relativamente estable. De hecho, tan solo aquellos que conservan un cierto grado de humedad y estabilidad en el lecho son capaces de mantener una comunidad vegetal pero siempre de origen terrestre. En un reciente estudio sobre las comunidades de plantas de las ramblas del sureste de España (Martínez-Yoshino et al., 2021) se analizaron los rasgos biológicos que caracterizaban las plantas que habitan en ellas. Los resultados mostraron que la vegetación capaz de vivir en estos ecosistemas tenía un claro perfil xerófilo, con la presencia dominante de taxones perennes, de pequeño tamaño, principalmente fanerófitas y caméfitas, con hojas de textura blanda, flores pequeñas de colores claros (amarillo y blanco), agrupadas en inflorescencias y frutos pequeños de colores pardos; con raíces simples, sin defensas físicas en hojas y tallos, y que utilizan la anemocoria como principal mecanismo de dispersión. Todos ellos rasgos que posibilitan su supervivencia (resiliencia) en estos ambientes estresados.

Dadas las especiales capacidades adaptativas de las plantas que colonizan los cursos efímeros, los impactos y alteraciones que sufren tienen más que ver con las actividades humanas (por ejemplo, extracción de gravas o arena del lecho; canalización de los cauces, etc.) que con las alteraciones hidrológicas (avenidas de agua). Así, Stubbington et al. (2019) demostraron que las plantas de los cauces secos responden, entre otros, a la composición de los sedimentos y a los impactos geomorfológicos. De hecho, su capacidad de resiliencia depende más de la configuración y estabilidad morfológica de los cauces efímeros que de sus propios rasgos biológicos y fisiológicos, ya seleccionados por las condiciones ambientales típicas de estos cauces.

3.2. Diagnóstico

En los cauces efímeros se asiste con máxima crudeza a un problema generalizado derivado de la percepción social negativa de los ríos secos, por el mero hecho de no llevar agua a la vista, además de ser considerados potencialmente peligrosos por su torrencialidad (Llasat et al., 2008). Esta percepción, totalmente asentada en la sociedad, a pesar de la abundancia y carácter autóctono de este tipo de cauces, no ha sido aún estudiada a nivel psicológico y sociológico, ni ha sido contrastada y cuantificada científicamente mediante métodos como las encuestas, pero es evidente para muchos expertos y ha sido debatida en numerosos foros, reuniones y congresos. Se ha llamado la atención sobre ello desde la denuncia por el desprecio por las gravas (Ollero et al., 2011b) y en trabajos que promueven un cambio de mentalidad desde la geomorfología para poder abordar la restauración fluvial (Horacio, 2015; Ollero, 2015).

Otro problema, generalizable a la mayoría de los tipos de cursos fluviales de este entorno, deriva de las perturbaciones y modificaciones inducidas por acciones humanas. Las medidas de gestión, por ejemplo obras en el cauce o regulación de caudales, provocan efectos directos como estrechamiento, pérdida de movilidad o sustitución de especies ribereñas (Sanchis et al., 2019). A estos hay que sumar los cambios indirectos, asociados a alteraciones en los usos del suelo de la cuenca y cuya repercusión en la producción de sedimentos y escorrentía genera nuevas condiciones medioambientales a las que el sistema fluvial se intenta adaptar (Conesa-García et al., 2007).

Los efectos del cambio climático y global sobre la morfología de los cursos efímeros mediterráneos (CEM) parece que pueden seguir, en algunas regiones, pautas similares a los registrados en las últimas décadas en los ríos de gravas que descienden de las cordilleras europeas, mucho más estudiados. La acción humana ha acelerado procesos sinérgicos de incisión, estrechamiento y colonización vegetal que han modificado considerablemente la morfología y la ecología de numerosos cauces (Ollero, 2011; Martín Vide et al., 2010; Segura y Sanchis, 2013). Todas estas perturbaciones necesitan ser monitorizadas de forma regional para así comprender mejor y proponer medidas específicas para los CEM.

Ahora bien, la baja frecuencia de los caudales en los cursos efímeros tiene también otras implicaciones específicas, que pueden diferenciarlos de los perennes. En los efímeros, la variabilidad temporal de la magnitud y frecuencia del caudal y la conectividad hidrológica dentro del propio cauce y respecto de su red, explican las dificultades para absorber los impactos y darles una respuesta rápida. Es por ello que los episodios de avenidas extraordinarias capaces de dar conexión hidrológica y sedimentaria a toda la red adquieren gran relevancia. Es después de estos episodios cuando se observan grandes cambios, que responden a impactos producidos en años o décadas anteriores. En consecuencia, las respuestas de los cursos efímeros a los cambios pueden estar diferidas en el tiempo y el espacio con un retardo superior al de los ríos perennes (Segura, 2014).

El diagnóstico del estado o situación ambiental de los cursos efímeros puede llevarse a cabo a través de índices que reúnen diferentes indicadores hidromorfológicos y ecológicos. De una forma simplificada a partir de la realidad siempre compleja, dichos índices aportan una puntuación, que sirve para evaluar las dimensiones de los problemas y para comparar los casos concretos entre sí. Hay numerosos índices de evaluación o diagnóstico de cursos fluviales, en todos los países, aunque son escasos los que pueden ser aplicados a cursos efímeros. Dos índices específicos para estos cursos, el IHG-E y el IAR, han sido diseñados y aplicados por diversos autores de esta guía.

Índice IHG-E

El índice hidrogeomorfológico IHG (Ollero et al., 2007, 2009, 2011a) ha sido muy empleado en diferentes trabajos tanto en la Península Ibérica como en América (Ollero et al., 2021a). En los últimos años se ha trabajado en una versión del índice adaptada a cursos efímeros (IHG-E), habiéndose aplicado en la cuenca del Júcar (Ballarín y Mora, 2018) y en el contexto del presente proyecto CCAMICEM (Sanmartín, 2019; Prados, 2020; Ollero et al., 2021b). No es todavía un índice definitivo, sino que en el proceso de mejora se está trabajando en la comprobación y combinación de los resultados con otros indicadores como los de resiliencia geomórfica (Sanchis et al., 2017; Segura y Sanchis, 2018; Calle, 2018), así como con los indicadores hidromorfológicos del procedimiento de muestreo y seguimiento de los sistemas IDRAIM y SUM y del índice MQI (Rinaldi et al., 2016). De esta manera, el IHG-E estimado por tramos y su interacción con el resto de indicadores puede ser esencial a la hora de valorar las capacidades de recuperación de los cauces y de sus tramos; y el diagnóstico resultante constituirá la base para la definición de medidas de acción.

El índice IHG-E está diseñado en tres bloques de indicadores: calidad funcional del sistema (tabla 4), calidad del cauce (tabla 5) y calidad del espacio ribereño (tabla 6). En su aplicación se obtiene un resultado general de la calidad hidrogeomorfológica y también un resultado para cada uno de los bloques analizados. Estos bloques no tienen el mismo peso en el resultado final del índice, están ponderados según la importancia asignada a cada uno de estos bloques en el funcionamiento de los cursos efímeros. Cada uno de los bloques analizados se divide en tres indicadores, también ponderados según su importancia. Cada uno de los parámetros de análisis (indicadores) tiene una puntuación máxima que se alcanza cuando en la evaluación de un tramo no se detecta ninguno de los impactos que afectan a ese parámetro. La aplicación del índice consiste en restar a la puntuación máxima posible en cada parámetro la rebaja de puntos que la ficha establece para cada impacto detectado. La puntuación de cada bloque se halla sumando los tres parámetros que lo componen y la puntuación final de calidad hidrogeomorfológica sumando los tres bloques.

Tabla 4

Valoración de la calidad funcional del sistema

Naturalidad del caudal hídrico

El caudal hídrico circulante responde en su volumen, en su régimen estacional y en sus procesos extremos a la dinámica natural, por lo que el sistema fluvial cumple perfectamente su función de transporte hidrológico		10
Aguas arriba o en el propio sector hay actuaciones humanas (embalses, derivaciones, vertidos, detracciones, pozos, retornos, trasvases, urbanización de la cuenca, incendios, repoblaciones, etc.) que modifican la cantidad de caudal circulante y/o su distribución temporal	si hay alteraciones muy importantes de caudal, de manera que se invierte el régimen estacional natural, o bien circula de forma permanente un caudal estable de origen antrópico	-10
	si hay alteraciones marcadas en la cantidad y temporalidad del caudal circulante	-8
	si hay variaciones en la cantidad de caudal circulante pero las modificaciones del régimen estacional son poco marcadas	-6
	si hay algunas variaciones en la cantidad de caudal circulante pero se mantiene bien caracterizado el régimen estacional de caudal	-4
	si hay modificaciones leves de la cantidad de caudal circulante	-2

(catálogo de actuaciones, datos hidrológicos, comprobación en campo)

Naturalidad del caudal sólido

El caudal sólido no presenta retención alguna de origen antrópico y el sistema fluvial moviliza y transporta los sedimentos de forma natural.		20
En la cuenca vertiente y en los sectores superiores del sistema fluvial principal hay presas con capacidad de retener sedimentos	si más de un 75% de la cuenca vertiente hasta el sector cuenta con retención de sedimentos	-3
	si entre un 25% y un 75% de la cuenca vertiente hasta el sector cuenta con retención de sedimentos	-2
	si hay presas que retienen sedimentos, aunque afectan a menos de un 25% de la cuenca vertiente hasta el sector	-1
En los afluentes directos al sector hay presas o elementos con capacidad de retener sedimentos	importantes	-2
	puntuales	-1
En las vertientes del valle a lo largo del sector hay elementos o alteraciones antrópicas que retienen sedimentos o afectan a su movilidad o a su conexión con el cauce	importantes	-2
	puntuales	-1
En el cauce dentro del sector hay una o más presas con capacidad de retener sedimentos		-3
En el cauce dentro del sector hay obstáculos (vados, estructuras, azudes colmatados, restos...) con capacidad de retener sedimentos	si hay varios obstáculos	-2
	si hay un obstáculo	-1
En el sector se registran extracciones de áridos o dragados que reducen la disponibilidad de sedimentos y alteran su movilidad	importantes y frecuentes	-6
	puntuales	-3
En el sector hay sedimentos compactados o removidos por paso de vehículos u otros factores antrópicos, o bien entre los sedimentos hay escombros o elementos no naturales	importantes	-2
	puntuales	-1

(catálogo de actuaciones, cartografía, fotografía aérea, comprobación en campo)

Funcionalidad en crecida

El cauce y el espacio inundable puede ejercer sin restricción antrópica sus funciones de disipación de energía en crecida, laminación de caudales-punta por desbordamiento y decantación de sedimentos		15	
En el sector hay actuaciones (dragados, extracciones...) o elementos antrópicos (vados, presas, obstáculos...) dentro del cauce menor que alteran los procesos y flujos en crecida	en más del 20% de la longitud del tramo	-3	
	entre un 5% y un 20% de la longitud del tramo	-2	
	en menos del 5% de la longitud del tramo	-1	
El espacio inundable cuenta con defensas longitudinales que restringen las funciones naturales de laminación, decantación y disipación de energía	en más del 20% de la longitud del tramo	en menos del 20% de la longitud del tramo	
	defensas continuas en ambas márgenes (canalización)	-6	-3
	defensas discontinuas o en una margen	-4	-2
	defensas alejadas del cauce menor	-2	-1
El espacio inundable fuera del cauce tiene usos del suelo (urbanos, industriales) u obstáculos (defensas, vías de comunicación, edificios, acequias...) que alteran los procesos hidrogeomorfológicos de desbordamiento e inundación y los flujos de crecida	abundantes	-4	
	puntuales	-2	
El espacio inundable presenta usos del suelo que reducen su funcionalidad natural	si los terrenos sobreelevados o impermeabilizados superan el 10% de su superficie	-2	
	si hay terrenos sobreelevados o impermeabilizados aunque no alcanzan el 10% de su superficie	-1	

(catálogo de actuaciones, cartografía, fotografía aérea, comprobación en campo)

Valoración de la calidad funcional del sistema

Tabla 5
Valoración de la calidad del cauce

Naturalidad de la forma en planta



La forma en planta del cauce se mantiene inalterada y su morfología presenta los caracteres y dimensiones acordes con las características de la cuenca y del valle y con el funcionamiento natural del sistema		5	
Se han registrado cambios de trazado artificiales y modificaciones antrópicas directas o indirectas (cambios derivados de actividades aguas arriba) de la morfología en planta del cauce	en más del 10% de la longitud del sector	en menos del 10% de la longitud del sector	
	si ha habido cambios drásticos (desvíos, cortas...)	-5	-3
	si se han registrado cambios menores (retranqueo de márgenes, pequeñas rectificaciones...)	-4	-2
	si hubo cambios antiguos que el sistema fluvial ha naturalizado parcialmente	-2	-1

(catálogo de actuaciones, cartografía, fotografía aérea, comprobación en campo)

Naturalidad longitudinal y vertical



El cauce es natural y continuo y sus procesos hidrogeomorfológicos longitudinales y verticales son funcionales y naturales		15
En el cauce hay estructuras que rompen la continuidad longitudinal y alteran la morfología del fondo del cauce	si hay al menos una presa de más de 10 m de altura	-3
	si hay varios azudes de menos de 10 m de altura	-2
	si hay un solo azud de menos de 10 m de altura	-1
Hay vados y pasos de pistas y caminos que alteran la continuidad longitudinal del cauce	más de 1 por cada 2 km de cauce	-6
	menos de 1 por cada 2 km de cauce	-2
Hay puentes u otros obstáculos menores que alteran la continuidad longitudinal del cauce	más de 1 por cada 2 km de cauce	-2
	menos de 1 por cada 2 km de cauce	-1
La topografía del fondo del lecho y la disposición de los sedimentos muestran síntomas de alteración por dragados, extracciones, solados, paso de vehículos...	en más del 20% de la longitud del sector	-4
	entre el 5 y el 20% de la longitud del sector	-2
	de forma puntual	-1

(catálogo de actuaciones, cartografía, fotografía aérea, comprobación en campo)

Naturalidad transversal

El cauce es natural y tiene capacidad de movilizarse lateralmente, ya que sus márgenes naturales presentan una morfología acorde con los procesos hidrogeomorfológicos de erosión y sedimentación		10
El cauce ha sufrido una canalización total o hay defensas de margen no continuas o infraestructuras (edificios, vías de comunicación, acequias...) adosadas a las márgenes	en más del 50% de la longitud del sector	-6
	entre un 20% y un 50% de la longitud del sector	-4
	entre un 5 y un 20% de la longitud del sector	-2
	de forma puntual	-1
Las márgenes del cauce presentan elementos no naturales, escombros o intervenciones que modifican su morfología natural	notables	-2
	leves	-1
En el sector se observan síntomas de que la dinámica lateral está limitada o no hay un buen equilibrio entre márgenes de erosión y de sedimentación, pudiendo ser efecto de actuaciones humanas en sectores aguas arriba	notables	-2
	leves	-1

(catálogo de actuaciones, cartografía, fotografía aérea, comprobación en campo)

Valoración de la calidad del cauce

Tabla 6
Valoración de la calidad de las riberas

Continuidad longitudinal



El corredor ribereño es continuo a lo largo de todo el sector funcional y en ambos márgenes del cauce menor, siempre que el marco geomorfológico del valle lo permita		5	
La continuidad longitudinal de las riberas naturales puede estar interrumpida bien por usos del suelo permanentes (urbanización, naves, granjas, graveras, edificios, carreteras, puentes, defensas, acequias...) o bien por superficies con usos del suelo no permanentes (choperas, cultivos, zonas taladas, caminos...).	si más del 30% de las discontinuidades son permanentes	si menos del 30% de las discontinuidades son permanentes	
	si el espacio ribereño está totalmente eliminado	-5	
	si hay un margen con el corredor ribereño totalmente eliminado y en la otra está parcialmente eliminado	-4	-3
	si hay un margen con el corredor ribereño totalmente eliminado y la otra más o menos natural	-3	-2
	si el corredor ribereño en ambos márgenes está parcialmente eliminado	-2	-1

(cartografía de usos del suelo, fotografía aérea, comprobación en campo)

Anchura del corredor



El corredor ribereño conserva toda su anchura potencial, de manera que cumple perfectamente su papel en el sistema hidrogeomorfológico.		5
La anchura del corredor ribereño ha sido reducida por ocupación antrópica	si la anchura media actual es inferior al 20% de la potencial	-5
	si la anchura media actual se encuentra entre el 20% y el 40% de la anchura potencial	-4
	si la anchura media actual se encuentra entre el 40% y el 60% de la anchura potencial	-3
	si la anchura media actual se encuentra entre el 60% y el 80% de la anchura potencial	-2
	si la anchura media actual es superior al 80% de la potencial	-1

(fotografías aéreas actuales y antiguas (comparación), comprobación en campo)

Estructura y naturalidad



En el corredor ribereño se conserva una estructura natural propia de estos ambientes, la naturalidad de las especies y toda la complejidad y diversidad transversal, no existiendo ningún obstáculo antrópico interno que separe o desconecte los distintos hábitats o ambientes que conforman el corredor.		5	
Hay presiones y elementos antrópicos en el corredor ribereño (pastoreo, desbroces, talas, incendios, explotación del acuífero, basuras, carreteras, defensas, acequias, pistas, caminos...) que alteran su estructura y su conectividad transversal.	si se extienden en más del 25% de la superficie del corredor actual	si se extienden en menos del 25% de la superficie del corredor actual	
	si las alteraciones son importantes	-3	-2
	si las alteraciones son leves	-2	-1
La naturalidad de la vegetación ha sido alterada por especies invasoras o por repoblaciones	si las alteraciones son significativas	-2	
	si las alteraciones son leves	-1	

(fotografía aérea, identificación en campo)

Valoración de la calidad de las riberas

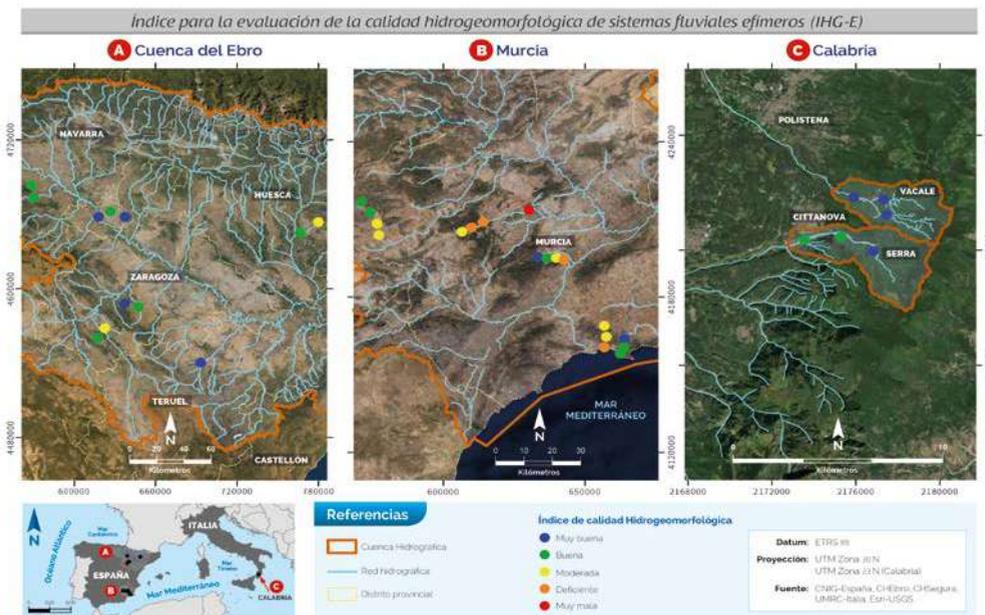


Figura 103. Aplicación del índice IHG en los cursos fluviales estudiados en el proyecto CCAMICEM.

Índice IAR

El Índice de alteración de Ramblas IAR (Suárez y Vidal-Abarca, 2008) fue diseñado para valorar el estado de conservación de las ramblas mediterráneas como respuesta a la total ausencia de criterios, por parte de la Directiva Marco del Agua, para establecer el estado ambiental de los cursos efímeros. Este índice está siendo utilizado en diferentes Demarcaciones Hidrográficas de España, como el Júcar y el Segura, para establecer el grado de alteración provocado por los impactos antrópicos sobre estos cauces. Además el IAR ha sido probado en arroyos secos de la península de Baja California (México) mostrando su utilidad para cualquier tipo de cauce efímero (Suárez et al., 2010).

El IAR combina la presencia de presiones/impactos en el tramo del cauce estudiado con la capacidad de recuperación del sistema asociada al grado de conectividad y la naturalidad del ecosistema adyacente. Entre los múltiples y variados impactos humanos detectados en las ramblas, se incluyen desde los efectos producidos por grandes presas hasta los que derivan de actividades relativamente poco impactantes como la recolección de siemprevivas, o de caracoles. En relación con los usos del suelo y la conectividad del cauce con la ladera, se cuantifica, de forma visual y semicuantitativa, ambas márgenes de la rambla independientemente. La conectividad valora la continuidad que existe entre la ladera y el cauce. En cuanto a los usos del suelo, se valoran, en %, el uso agrícola, urbano, industrial y el natural que incluye tanto las masas boscosas como los matorrales y herbazales típicos del ámbito mediterráneo semiárido. En las siguientes tablas 7 y 8 se sintetizan el protocolo para la aplicación y cálculo del IAR y la hoja de campo.

Tabla 7

Protocolo para la aplicación y cálculo del Índice de Alteración de Ramblas (IAR)

Pasos a seguir	Observaciones
Seleccionar un tramo de 100 m de longitud en la rambla, si es posible alejado de la zona de acceso al cauce.	Los puentes y caminos utilizados para acceder a la rambla se deben obviar dado que, en sí mismos, representan perturbaciones que pueden alterar el valor de los parámetros a medir.
La hoja de campo incluye dos apartados, cada uno con un objetivo diferente, que deben rellenarse de manera independiente.	Las hojas de campo incluyen un encabezamiento en el que se identifica la rambla, la localidad muestreada y la masa a la que pertenece.
Consideraciones útiles para rellenar la hoja de campo de las ramblas semiáridas mediterráneas	
1-Impactos antrópicos	
Se trabaja sobre los impactos detectados en el cauce de las ramblas. Se trata de analizar tanto la cantidad como la intensidad del impacto.	El valor del impacto es un indicador de la intensidad de la presión y está relacionado con su reversibilidad. Así, el valor de 1 indica que el impacto es fácilmente reversible y 10 que es totalmente irreversible.

2- Capacidad de recuperación													
Este apartado tiene en cuenta dos aspectos. Por un lado, se calcula la conectividad entre el cauce y la ladera en ambas márgenes de la rambla. En segundo lugar se cuantifican de forma semicuantitativa los usos del suelo en ambas márgenes de forma independiente.	Se trabaja sobre las laderas a ambos lados de los 100 m de rambla seleccionados.												
CÁLCULO Y CLASES DE CALIDAD DEL IAR													
IAR = 1 + II – CR													
Rango variación: 0-2													
(II) es el Índice de Impacto:	II = (Σ Valor de Impacto)/50												
Rango variación: 0-1													
es el sumatorio de los valores de los impactos detectados corregido por 50. Se ha establecido el valor de 50 como el máximo Índice de Impacto posible, teniendo en cuenta que el máximo valor detectado en el conjunto de ramblas donde ha sido aplicado es de 40 y ofreciendo un margen para otras ramblas													
(CR) es la Capacidad de recuperación del sistema: CR = ((Cmi * Nmi) + (Cmd * Nmd))/2													
Donde Cmi = Conectividad de la margen izquierda; Cmd = Conectividad de la margen derecha; Nmi = Naturalidad de la margen izquierda; Nmd = Naturalidad de la margen derecha													
Rango variación: 0-1													
Es el promedio de conectividad y naturalidad del ecosistema adyacente en ambas márgenes													
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Conectividad (%) Uso natural del suelo (%)</th> <th style="text-align: center;">Valor de aplicación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">>75</td> <td style="text-align: center;">1,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">50-75</td> <td style="text-align: center;">0,75</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25-50</td> <td style="text-align: center;">0,50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">< 25</td> <td style="text-align: center;">0,25</td> </tr> </tbody> </table>		Conectividad (%) Uso natural del suelo (%)	Valor de aplicación	>75	1,0	50-75	0,75	25-50	0,50	< 25	0,25		
Conectividad (%) Uso natural del suelo (%)	Valor de aplicación												
>75	1,0												
50-75	0,75												
25-50	0,50												
< 25	0,25												
CLASES DE CALIDAD DEL IAR													
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Clases de Calidad</th> <th style="text-align: center;">Estado de Conservación</th> <th style="text-align: center;">Valor del IAR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">I</td> <td style="text-align: center;">MUY BUENO</td> <td style="text-align: center;">< 0.4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">II</td> <td style="text-align: center;">BUENO</td> <td style="text-align: center;">0.4 – 0.9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">III</td> <td style="text-align: center;">< BUENO</td> <td style="text-align: center;">> 0.8</td> </tr> </tbody> </table>		Clases de Calidad	Estado de Conservación	Valor del IAR	I	MUY BUENO	< 0.4	II	BUENO	0.4 – 0.9	III	< BUENO	> 0.8
Clases de Calidad	Estado de Conservación	Valor del IAR											
I	MUY BUENO	< 0.4											
II	BUENO	0.4 – 0.9											
III	< BUENO	> 0.8											

Tabla 8

Hoja de campo para el cálculo del Índice de Alteración de Ramblas (IAR)

HOJA DE CAMPO PARA EL CÁLCULO DEL IAR										
Nº:	Nombre:				Fecha:					
Localidad:					Hora:					
UTM-X:			UTM-Y:		Altitud (m):					
Fotos										
PRESIONES/IMPACTOS ANTRÓPICOS										
	Presencia	Valor				Presencia	Valor			
Encauzamiento		10	Canal drenaje				5			
Carretera asfaltada		10	Extracción del subálveo				4			
Presa > 5m		10	Pozos en cauce				4			
Graveras		9	Árboles secos				4			
Cultivos en el cauce		9	Presa < 5m				3			
Ganado (restos)		9	Residuos sólidos orgánicos				2			
Entrada externa de agua		8	Escombros				2			
Efluentes líquidos		8	Pesticidas/herbicidas				2			
Quema de vegetación		7	Recolección vegetación				1			
Caminos en lecho		6	Recolección caracoles				1			
Rodaduras moto		6	Caza (restos)				1			
Rodaduras coche		6	Σ Valor de Impacto							
			$II = \Sigma \text{ Valor de Impacto} / 50$							
CAPACIDAD DE RECUPERACIÓN										
Conectividad cauce-ladera (%)	>75	50-75	25-50	<25	Margen izquierdo			Margen derecho		
Valor de aplicación	1,00	0,75	0,50	0,25	C_{mi}		C_{md}			
Uso natural del suelo (%)	>75	50-75	25-50	<25	Margen izquierdo			Margen derecho		
Valor de aplicación	1,00	0,75	0,50	0,25	N_{mi}		N_{md}			
			$[(C_{mi} * N_{mi}) + (C_{md} * N_{md})] / 2$				CR			
CÁLCULO DEL ÍNDICE										
$IAR = 1 + II - CR$										

3.3. Principios, criterios y condicionantes para restauración y una nueva gestión en cursos efímeros

La falta de antecedentes en la restauración de cursos efímeros y la relevancia de la geomorfología en su funcionamiento marcan la forma de actuar y llevan a un primer principio clave, el de gestión adaptativa. Este concepto fue definido por Holling (Ed., 1978) como el aprendizaje mientras se actúa, mejorando el sistema de gestión mientras se va aplicando, no dando importancia a un plan previo detallado, sino a la adaptación progresiva a los procesos naturales basada en el seguimiento, siempre con la vista puesta en la preservación de los valores ambientales. Esta gestión adaptativa está por tanto asociada a la sostenibilidad en sentido amplio, así como a los acuerdos con los agentes del territorio y al monitoreo científico multidisciplinar, todo ello en cambio permanente, modulando la toma de decisiones.

Otro principio inseparable del anterior es el de gestión ambiental integrada, de manera que deben combinarse y realimentarse entre sí la propia restauración, la gestión de riesgos y la ordenación del territorio. En los cursos efímeros este principio es fundamental y constituye un gran reto de nuestro tiempo, ya que estos sistemas fluviales cuentan con una consideración mínima o nula en el territorio y en su planificación, pero al mismo tiempo son protagonistas de eventos extremos y de graves situaciones de riesgo, por lo que los proyectos y procesos de restauración deben ser útiles para estas carencias, además de buscar la adecuada recuperación de la naturalidad sistémica.

Como se deduce de las características y funcionamiento de estos sistemas fluviales, expuesta en apartados anteriores, la restauración de cursos efímeros tiene que ser fundamentalmente geomorfológica y destinada a recuperar la funcionalidad y con ello los valores tanto hidromorfológicos como ecosistémicos. Y preferiblemente tiene que ser una restauración pasiva, en la que todo o la mayor parte del trabajo lo pueda realizar el curso de agua una vez eliminados o controlados los impactos. Estos criterios deberían guiar las propuestas a priori, aunque la propia adaptación de las mismas a lo largo del tiempo puede llevar a optar por posibilidades activas, más o menos puntuales, y a actuaciones de ámbito ecológico menos apoyadas en la geomorfología.

Para gestionar y restaurar cursos efímeros es preciso tener en cuenta varios condicionantes. En primer lugar, la conectividad hidrológica y sedimentaria (longitudinal, lateral, vertical y temporal) presenta grandes fluctuaciones (Camarasa y Segura, 2001, por lo que la absorción de los impactos y las respuestas son más lentas que en los ríos perennes. Al depender casi exclusivamente de las avenidas, los estados transitorios hasta que se adapta el curso a las nuevas condiciones ambientales pueden ser muy largos en el tiempo. Puede tardar en llegar una avenida geomórfica que reconstruya el cauce, por lo que emprender operaciones de restauración activa sin considerar estas circunstancias puede ser contraproducente (Segura et al., 2021).

Por otro lado, no pueden utilizarse modelos de referencia (por ejemplo, la situación en la fotografía aérea de 1956, propuesta en la ENRR) para la restauración de

cursos efímeros. Estos cursos tardan mucho tiempo en absorber los impactos y es muy difícil establecer en qué fase temporal se encuentran en cada momento, dado que los efectos están diferidos en el tiempo y el espacio. En consecuencia, es imprescindible analizar y determinar toda la trayectoria histórica para comprender la evolución de los factores, que determinan el estado actual (Dufour y Piégay, 2009). Dado que estos factores fluctúan mucho más que en los ríos perennes, se hace más evidente la necesidad de analizar las trayectorias como primer paso antes de proponer la restauración.

Trabajar en la trayectoria histórica de los ríos permite analizar su capacidad de resiliencia. Algunos trabajos realizados en ramblas mediterráneas sugieren que los cursos efímeros tienen una gran capacidad de autorregeneración, dado que poseen una elevada energía. El diseño de indicadores específicos de recuperación espontánea permite constatar el poder regenerador de las avenidas y la importancia que tienen los sucesos extremos en la evolución de las ramblas. Por ello es necesario seguir avanzando en esta línea, con la finalidad de tener instrumentos de diagnóstico y criterios de restauración basados en el funcionamiento real de los cursos efímeros (Sánchez et al., 2017, Calle et al., 2017).

De acuerdo con lo anterior, seguimos considerando importante, en principio, priorizar las restauraciones pasivas sobre las activas. Para ello es importante priorizar la eliminación de los impactos directos sobre los indirectos, dejando que el sistema fluvial pueda autorregenerarse. Esto supone también priorizar las acciones locales, en tramos concretos, frente a los proyectos a escala de cuenca. No obstante, dependiendo de la trayectoria de cada curso, en los casos en que no se observen indicios de autorregeneración, puede ser necesaria la restauración activa.

Esta síntesis de principios, criterios y condicionantes debe ser tomada en cuenta antes del planteamiento de un proyecto de restauración o cualquier buena práctica a aplicar en un escenario concreto. Por tanto, se han tenido en cuenta para definir las 33 buenas prácticas en cursos efímeros que se exponen en el capítulo siguiente.

Los cursos efímeros (ramblas, rieras, cauces secos salvo en avenidas repentinas y eventuales) tienen una gran presencia en el territorio mediterráneo, donde constituyen la mayor parte de la red fluvial. Son sistemas naturales fundamentales en el ciclo hidrológico para el transporte de agua, sedimentos y nutrientes, y, por tanto, excelentes indicadores del cambio climático y global.

Su puesta en valor, el reconocimiento de su papel, de sus valores hidromorfológicos y de sus servicios ecosistémicos son totalmente necesarios para entender su grado de resiliencia y contribución a la adaptación al cambio climático. Y es muy urgente trabajar en su gestión, restauración y conservación, porque en general se encuentran sometidos a fuertes presiones y están enormemente dañados.

La presente guía alerta sobre los múltiples impactos que sufren, divulga este gran patrimonio mediterráneo, tan subestimado y poco conocido, y propone 33 buenas prácticas para su gestión y restauración. Es una guía que puede aportar ideas a las personas responsables de la gestión, pero está destinada al conjunto de la sociedad, porque el reto es muy complejo: tenemos que recuperar cursos efímeros a partir del conocimiento y la sensibilización. Y actuar con rapidez, porque ya es tarde y hasta ahora prácticamente no se ha hecho nada por respetar, proteger y recuperar estos sistemas fluviales imprescindibles de nuestro territorio. Este es nuestro reto.

UNIVERSIDAD DE
MURCIA



ISBN-13: 978-84-09-32995-3



9 788409 329953