



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-325

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Herramienta informática para la selección de técnicas de bioingeniería en actuaciones de restauración fluvial

MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, A.¹, FERNÁNDEZ YUSTE, J.A.², MARTÍNEZ SANTA-MARÍA C.², SADORNIL ARENAS, E.³ y VIVAR SANZ, A.³

¹ Oficina Técnica. Creará Consultores

² Departamento de Ingeniería Forestal y del Medio Natural. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

³ Departamento de Matemática Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

Las técnicas de bioingeniería han experimentado un auge creciente como herramienta en la rehabilitación y restauración de ecosistemas fluviales. Sin embargo, a día de hoy, la información técnica disponible se encuentra en general muy dispersa, incompleta e irregularmente estructurada. Se presenta una herramienta informática desarrollada en Microsoft Excel para la selección de la técnica de bioingeniería más adecuada a partir de un conjunto de variables de entrada definitorias de las condiciones hidráulicas, topográficas y ambientales del tramo de actuación.

La aplicación está estructurada en dos módulos:

I) Base de datos confeccionada a partir de consulta bibliográfica y síntesis de información. En ella, para las principales técnicas se presenta su descripción y sus especificaciones más relevantes, en especial los valores limitantes de velocidad del flujo, los cortantes admisibles y la pendiente máxima del talud.

II) Aplicación de cálculo, estructurada en tres fases:

1. Introducción de variables de partida: procedentes de trabajo de campo y de la modelización hidráulica del tramo.
2. Cálculo de variables de salida: principalmente el cortante medio y los cortantes máximos en lecho y talud, además de la distribución de esta variables en la sección. Se considera también el incremento de cortante y sus efectos en tramos curvos.
3. Comparación de las variables obtenidas en la fase 2 con los umbrales establecidos para las distintas técnicas en la base de datos, resultando la selección de técnicas viables.

Palabras clave

Ríos, estabilización de taludes, esfuerzo cortante.

1. Introducción

La bioingeniería aplicada a la restauración de ríos y riberas se fundamenta en el uso de plantas vivas o partes de éstas conjuntamente con otros materiales naturales (madera, rocas, mantas y redes orgánicas, metal) y otros sintéticos (geotextiles, redes, geomallas de polipropileno, etc.), incorporando y aprovechando los elementos locales (suelo, topografía, microclima, etc.) para conseguir objetivos estructurales en una actuación de restauración fluvial (Fundación Nueva Cultura del Agua, 2015).

Para que la elección de la técnica de bioingeniería empleada sea la más adecuada, hay que tener en cuenta aspectos biológicos y físico-mecánicos. Respecto a los aspectos biológicos, existe amplia información sobre las especies a utilizar, el tipo de planta, la época de implantación o el mantenimiento de las distintas técnicas. Sin embargo los aspectos físico-mecánicos, concretamente los esfuerzos a los que se verá sometido el material como consecuencia de la circulación del flujo en cauces naturales, han sido escasamente estudiados, estando generalmente enfocada la investigación hacia su estimación en cauces artificiales (canales). A este desconocimiento se suma la

falta de información contrastada sobre las acciones máximas del flujo que soportan las diferentes técnicas.

Recordemos una actuación es estable cuando no se supera el umbral de inicio del movimiento. Esta condición queda formulada en la Ecuación 1:

$$\tau_{crit} \geq \tau_{flujo} \text{ (Ecuación 1)}$$

τ_{crit} = cortante crítico del material que cubre la sección (N/m²)

τ_{flujo} = cortante del flujo en la sección (N/m²)

El cortante crítico depende de las características del material (naturaleza y tamaño) y evalúa el valor del cortante mínimo necesario para que dicha partícula empiece a moverse. Esta información a día de hoy se encuentra dispersa en diferentes medios. La base de datos creada en esta aplicación la recopila y sistematiza. El cortante de flujo depende de las características hidráulicas (calado y pendiente del cauce) y evalúa la acción del flujo que tiende a mover la partícula. Su metodología de cálculo está bien estudiada en canales pero no ha sido contrastada para cauces naturales.

La aplicación informática que aquí se presenta ha sido desarrollada por D. Alvaro Martínez Fernández como Proyecto Fin de Grado del Ingeniero del Medio Natural (Universidad Politécnica de Madrid). Con ella se sistematiza la estimación del cortante de flujo y se recopila la información disponible sobre cortantes críticos.

2. Objetivos

El objetivo general de esta comunicación es presentar una herramienta informática que permite determinar, conocidos un conjunto de parámetros representativos, cuál es la técnica de bioingeniería más adecuada para la estabilización de taludes en el ámbito de la restauración de ríos.

Como objetivos parciales pueden citarse:

- Confeccionar una base de datos que recopile la información disponible respecto a las técnicas de bioingeniería especialmente en lo relativo a solicitaciones máximas admisibles junto con otras características relevantes.
- Presentar un proceso sistemático y contrastado de cálculo del cortante del flujo en lecho y taludes para cauces naturales, ofreciendo valores máximos y su distribución en la sección.

El uso de la aplicación que se presenta servirá como apoyo al técnico en la toma de decisiones, al avalar dicha elección en una estimación estricta de las solicitaciones del flujo a las que se va a ver sometida la técnica de bioingeniería. De este modo se evitan soluciones generalistas, sobredimensionadas o deficientes.

3. Metodología

La metodología seguida para la elaboración de esta aplicación informática puede esquematizarse en las etapas siguientes:

3.1. Recopilación bibliográfica y creación de la base de datos de técnicas de bioingeniería

Las fuentes consultadas han sido documentos técnicos y revistas científicas, libros y manuales, otros documentos de carácter profesional, proyectos de restauración fluvial y fichas técnicas de productos de las distintas casas comerciales. Con la información recopilada se ha elaborado una base de datos en Microsoft Office Excel. En ella y para cada técnica se recoge la información siguiente: descripción de sus características más destacadas - campo de aplicación, época de implantación y especies vegetales a utilizar según la región ecológica- y las principales

limitaciones hidráulicas y geométricas - velocidad del flujo, cortante y pendiente del talud admisibles-. Estas tres últimas variables se cuantifican a tres niveles: valor mínimo, medio y máximo limitante, con indicación de las referencias bibliográficas que lo avalan. La base de datos recoge un total de 80 técnicas de bioingeniería (Tabla 1) y se complementa con la elaboración de una ficha resumen para cada una de ellas.

Tabla 1. Relación de técnicas de bioingeniería contempladas en la aplicación informática.

Plantación de esp. leñosas, arbóreas y arbustivas	Enfajinado de en fibra vegetado tipo Fiber Roll™
Plantas leñosas enraizadas	Lecho fibra vegetado Fiber Roll™
Estaquillado	Biorrollos para el control de la erosión
Plantación de estacones de sauce	Geomalla degradable SC150
Trasplante de rizomas	Geomalla degradable SC150BN
Cobertura de ramas	Geomalla degradable C125
Estera de ramas	Geomalla degradable C125BN
Estaquillado y cobertura de ramas (Inicial)	Geomalla permanente SC250
Estaquillado y cobertura de ramas (Crecido)	Suelo desnudo
Estaquillado y cobertura de ramas	Geomalla permanente SC250
Revestimiento de árboles	Suelo vegetado
Rootwads	Geomalla permanente C350 Suelo desnudo
Tocones enraizados	Geomalla permanente C350 Suelo vegetado
Hilera de tocones	Geomalla permanente P550 Suelo desnudo
Trenzado	Geomalla permanente P550 Suelo vegetado"
Trenzado de ramas muertas	Geomalla permanente P300 Suelo desnudo"
Tunicaje o trenzado vivo	Geomalla permanente P300 Suelo vegetado"
Fajina	Muros verdes Deltalok
Fajina viva o haces de ramas	Tierra armada
Fila de fajinas	Gavión cilíndrico o Rock Roll
Muro de fajinas	Gavión flexible laminar, o Rock Roll
Ribalta	Gavión
Enrejado vivo	Gavión de recubrimiento
Entramado vivo	Gavión con estacas vivas
Muro de madera "Cribwall"	Entramado Loricata
Krainer	Escollera revegetada
Deflector vivo estructurado con krainer	Escollera con estacas vivas 24 in
Deflector	Muro celular de hormigón revegetado
Tepe	Bloques encadenados
Manta orgánica	Muros de contención
Redes orgánicas	Soft Armor Walls
Unidad de planta estructurado fibra Plant Plug™	Malla de Paja
Herbazal estructurado en fibra tipo	Fibra de vidrio
Plant Pallet™ o Plant Carpet™	Escollera 6-in. D50
Geomallas	Escollera 9-in. D50
Geotextil con estaquillas vivas	Escollera 12-in. D50
Geoceldas	Escollera 18-in. D50
Geomalla gunitada	Escollera 24-in. D50
Rollo estructurado en fibra vegetado Fiber Roll™	Fibra de caña
Gavión flexible tipo Rock Roll™	Rollo de fibra de coco

3.2. Estimación de las solicitaciones del flujo.

El objetivo es establecer una metodología de cálculo de las principales variables hidráulicas implicadas en la estabilidad de la actuación, que sea aplicable a cauces naturales y susceptible de sistematizarse informáticamente. La primera variable considerada es la velocidad del flujo, planteándose como objetivo caracterizar la velocidad media en las celdas o subsecciones consideradas en la sección transversal. La segunda variable es el cortante del flujo o fuerza que ejerce el flujo por unidad de superficie del contorno. Del cortante nos interesa conocer su valor máximo y su distribución en la sección, tanto en el lecho como en los taludes. Se comenzó realizando una revisión de las metodologías de cálculo de las principales variables hidráulicas para

conducciones abiertas a través de la consulta de diversas fuentes (libros técnicos, artículos científicos y manuales de softwares de modelización hidráulica). Tras esta fase de recopilación se hicieron evidentes un conjunto de dificultades:

- Para cauces artificiales existe una amplia bibliografía sobre la estimación del cortante (medio o máximo) del flujo, no así para cauces naturales.
- Hay escasas referencias sobre la distribución del cortante en lechos y taludes para cauces artificiales, siendo nulas para cauces naturales.
- La variabilidad morfológica de las secciones naturales dificulta sobremanera la generalización de los algoritmos propuestos para cauces artificiales para la estimación de cortantes.
- Algunas metodologías requieren parámetros de difícil estimación en cauces naturales.
- En actuaciones de restauración fluvial es necesario considerar el incremento que experimenta el cortante en tramos curvos, así como el valor de la longitud de margen afectada.

3.2.1. Estimación de la velocidad del flujo

La velocidad media para cada margen y para el cauce principal puede obtenerse directamente mediante la aplicación informática HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers y disponible en <http://www.hec.usace.army.mil/software/> introduciendo la correspondiente geometría del cauce y el caudal a modelizar. HEC-RAS nos permite conocer la distribución de velocidades en la sección transversal en tantas subsecciones como el usuario indique utilizando el comando “*Flow distribution Location*”.

3.2.2. Estimación de la pendiente del talud

A diferencia de los que sucede en cauces artificiales donde los taludes se diseñan con pendiente uniforme, en los cauces naturales la pendiente suele presentar una acusada variabilidad. Por ello se hace necesario para la aplicación que se va a desarrollar el poder sistematizar su cálculo. Se propone el siguiente algoritmo para la estimación de la componente de inclinación horizontal del talud (z) para cada tramo o subsección considerada:

$$\frac{X}{Y} = \frac{1}{Z} \text{ (Ecuación 2)}$$

Y = Distancia entre cotas (m)

X = Distancia entre estaciones o puntos (m)

Z = Componente de inclinación horizontal del talud 1:Z (V:H)

3.2.3. Estimación del cortante del flujo

Cuando el agua fluye en un canal, se desarrolla una fuerza que actúa sobre el lecho de éste en la dirección del flujo. Esta fuerza o empuje del agua sobre el área mojada, se conoce con el nombre de cortante del flujo o esfuerzo cortante. Para cauces artificiales existe una amplia bibliografía sobre la estimación y variabilidad del cortante del flujo, generalizándose la siguiente expresión para la estimación del cortante medio:

$$\tau = \gamma \cdot Rh \cdot Se \text{ (Ecuación 3)}$$

τ = cortante medio del flujo en la sección (N/m²)

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³)

Rh = Radio hidráulico (m) = Sm (superficie mojada) / Pm (perímetro mojado)

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno

Como ya se ha comentado, este cortante no se distribuye uniformemente a lo largo del perímetro mojado, siendo necesario conocer no sólo el valor del cortante medio sino también: i) el

valor máximo que alcanza el cortante tanto en el lecho como en el talud, ii) la localización de este máximo, iii) la distribución de los cortantes en el conjunto de la sección.

Tomando como referencia la distribución de cortantes en lecho y talud establecida por Lane (1952) se proponen asumir para lecho y taludes una distribución del cortante máximo proporcional al calado:

$$\frac{\tau_i}{\tau_{\text{máx lecho o talud}}} = \frac{D_i}{D} \quad (\text{Ecuación 4})$$

τ_i = Cortante del flujo (N/m²) en la estación (x) correspondiente

$\tau_{\text{máx lecho o talud}}$ = Cortante máximo en el lecho o talud según corresponda (N/m²)

D_i = Calado de la estación (x) correspondiente (m)

D = Calado máximo en la sección transversal (m)

En la bibliografía consultada para canales artificiales, casi todas las metodologías consultadas parten de estimar el cortante medio por la Ecuación 3, y a partir del resultado obtenido, presentan diferentes procesos de ponderación para estimar por separado el cortante máximo en el lecho y talud. Además algunas de ellas consideran también el incremento en la magnitud del cortante como consecuencia de la disposición en curva. Otro aspecto que puede incrementar el valor del cortante es la persistencia en el tiempo de altos caudales, circunstancia que, aunque mencionada, raramente es cuantificada.

En un primer paso y fruto de la revisión bibliográfica se seleccionaron cinco metodologías de cálculo del cortante (Método 1 a Método 5). Para todas ellas se han chequeado algunos aspectos relevantes para la consecución de los objetivos de este trabajo (Tabla 2):

Tabla 2. Comparativa de las metodologías de cálculo de cortantes del flujo consideradas

	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5
	Mays (1999)	Lane (1952)	Lane (1952)	Javid & Mohammadi (2012)	Kilgore & Cotton (2005)
Aplicación a cauces naturales					
Uso en Ingeniería hidráulica	X	X			X
Datos de fácil obtención	X	X	X		X
Sistematización informática			X	X	X
Consideración de tramos curvos	X	X			X

Método n° 1: Mays (1999): este autor estima el cortante medio del flujo (τ) por la Ecuación 3. A partir del valor medio corregido con un coeficiente de mayoración (Ecuaciones 8 y 9) obtiene los cortantes máximos en lecho y en talud con las Ecuaciones 5 y 6. Calcula también el cortante máximo en curva (Ecuación 7 y 10).

$$\tau_{\text{máx lecho}} = K_{\text{lecho}} \cdot \tau \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\tau_{\text{máx talud}} = K_{\text{talud}} \cdot \tau \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\tau_{\text{curva}} = K_{\text{curva}} \cdot \tau \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$K_{\text{lecho}} = \frac{\frac{B}{D} + 2 \cdot \sqrt{Z^2 + 1}}{\frac{B}{D} + Z} \quad \text{para } \frac{B}{D} > 8 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$K_{\text{talud}} = C \cdot \frac{\frac{B}{D} + 2 \cdot \sqrt{Z^2 + 1}}{\frac{B}{D} + Z} \quad \text{para } \frac{B}{D} > 8 \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$K_{\text{curva}} = 2,4 \cdot e^{-0,0852 \cdot \frac{Rc}{B}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$\tau_{\text{máx lecho}}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²)
 $\tau_{\text{máx talud}}$ = Cortante de flujo en el talud a máxima profundidad (N/m²)
 τ = Cortante medio del flujo (N/m²)
 K_{lecho} = Coeficiente de mayoración para el lecho
 K_{talud} = Coeficiente de mayoración para el talud
 K_{curva} = Coeficiente de mayoración para curva
 B = Anchura de la superficie libre (m)
 D = Calado máximo de la sección (m)
 Z = Componente de inclinación horizontal del talud 1: Z (V:H)
 C = Coeficiente relacionado con la pendiente del talud (consultar Mays (1999))
 R_c = Radio de curvatura (m)

Como limitaciones principales a este método pueden citarse:

- No se puede sistematizar completamente ya que son necesarios los ábacos de mayoración.
- El cálculo solo contempla 5 tipos de pendientes diferentes en el talud.
- El método se ha concebido para secciones trapezoidales de canales artificiales, donde las variables calado y pendiente del talud son constantes, no así en cauces naturales por lo que se limita bastante su sistematización y aplicabilidad.

Método nº 2: Lane (1952). El autor parte de estimar el cortante medio según la Ecuación 3 y un cortante del flujo de referencia que tiene en cuenta el calado máximo y la pendiente de fricción asociada con la rugosidad del grano (Ecuaciones 11-13). Los cortantes máximos en lecho y talud se obtienen ponderando el cortante anterior por unos coeficientes de ponderación dependientes de la relación anchura de la superficie libre/calado y pendiente del talud a través de unos ábacos de mayoración.

$$\tau^{\infty} = \gamma \cdot D \cdot St \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$St = \left(\frac{ns}{n}\right)^2 \cdot Sem \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$ns = \frac{D75^{1/6}}{66,9} \quad (\text{Ecuación 13})$$

τ^{∞} = Cortante de flujo de referencia (N/m²)
 γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³)
 D = Calado máximo de la sección (m)
 St = Pendiente de fricción asociada a la rugosidad del grano, en tanto por uno
 ns = Rugosidad del grano (mm)
 n = Coeficiente de rugosidad de Manning del lecho
 Sem = Pendiente total de fricción obtenida de la ecuación de Manning, en tanto por uno
 $D75$ = Diámetro del grano (mm)

Como limitaciones pueden citarse:

- Para la utilización de este segundo método habría que estimar el diámetro D75 de los materiales del lecho, lo que implica una dificultad en la toma de datos.
- Existe un mayor número de fórmulas y variables que en el anterior método, por lo que su sistematización para cauces naturales puede tener también una mayor complicación.
- Como en Método 1, el Método 2 se ha diseñado para una sección trapezoidal de un canal artificial, por lo que limita bastante la sistematización a cauces naturales.
- Se necesitan los ábacos para calcular el coeficiente de mayoración en el lecho y para los cuatro tipos de pendiente de talud consideradas, por lo que este paso no puede sistematizarse.

Método nº 3: Lane (1952). El mismo autor del método anterior plantea otra opción de cálculo donde estima el cortante medio por la Ecuación 3, pero presenta formulaciones específicas para los cortantes máximos en lecho (Ecuación 14) y talud (Ecuación 15).

$$\tau_{\text{máx lecho}} = 0.97 \cdot \gamma \cdot D \cdot Se \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\tau_{m\acute{a}x\ talud} = 0.75 \cdot \gamma \cdot D \cdot Se \quad (\text{Ecuaci3n 15})$$

$\tau_{m\acute{a}x\ lecho}$ = Cortante del flujo en el lecho en su punto medio (N/m²)

$\tau_{m\acute{a}x\ talud}$ = Cortante máximo de flujo en el talud a un tercio de su longitud respecto del lecho (N/m²)

γ = Peso específico del agua con sedimentos (N/m³)

D = Calado máximo de la secci3n (m)

Se = Pendiente de la línea de energía, en tanto por uno

Como limitaciones pueden citarse que al igual que en los casos anteriores, el método esta diseñado para una secci3n trapezoidal de un canal artificial rectilíneo, lo que limita su aplicabilidad en cauces naturales.

Método n 4: Javid & Mohammadi (2012). En este método el cortante medio se estima mediante la Ecuaci3n 14 expuesta anteriormente: Con las Ecuaciones 16 y 17 se obtienen los cortantes máximos en lecho y talud respectivamente.

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x\ lecho}}{\tau} = \text{Exp} \left(\mu + \frac{D}{b} \right) - \lambda \cdot \frac{D}{B} \cdot \text{Exp} \left[\mu \cdot \frac{D}{b} \cdot \left(\beta + \delta \cdot \text{Ln} \frac{D}{b} \right) \right] \quad (\text{Ecuaci3n 16})$$

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x\ talud}}{\tau} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \left[1 + \frac{b}{D} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{m\acute{a}x\ lecho}}{\tau} \right) \right] \quad (\text{Ecuaci3n 17})$$

$\tau_{m\acute{a}x\ lecho}$ = Cortante del flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²)

$\tau_{m\acute{a}x\ talud}$ = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m²)

τ = cortante medio del flujo (N/m²)

D = Calado máximo de la secci3n (m)

b = Anchura del fondo (m)

$\mu, \lambda, \beta, \delta$ = Coeficientes de correcci3n dependientes del grado de inclinaci3n del talud (Javid & Mohammadi, 2012)

Como limitaciones pueden citarse:

- Existen excesivos factores de correcci3n a tener en cuenta a la hora de aplicar la f3rmula correspondiente al cortante máximo en el lecho. Asimismo, no se puede precisar si estos coeficientes son adecuados para su utilizaci3n en cauces naturales.
- Como consecuencia de estos factores de correcci3n, la adecuaci3n a la aplicaci3n informática se hace más complicada.
- Como en los casos anteriores, el método esta diseñado para canales trapezoidales.
- El método s3lo contempla cuatro tipos de inclinaci3n de los taludes.
- El número de datos de partida necesarios es mayor que en otros métodos.

Método n 5: Kilgore & Cotton (2005). Este método calcula el cortante medio por la Ecuaci3n 3 y a partir de ese valor obtiene los máximos en lecho y talud por las ecuaciones 18 y 19. Estima además un cortante permisible por la Ecuaci3n 20.

$$\tau_{m\acute{a}x\ lecho} = \gamma \cdot D \cdot Se \quad (\text{Ecuaci3n 18})$$

$$\tau_{m\acute{a}x\ talud} = K_1 \cdot \tau_{m\acute{a}x\ lecho} \quad (\text{Ecuaci3n 19})$$

$$\tau_p \geq SF \cdot \tau_{m\acute{a}x\ lecho} \quad (\text{Ecuaci3n 20})$$

$\tau_{m\acute{a}x\ lecho}$ = Cortante de flujo en el lecho a máxima profundidad (N/m²)

$\tau_{m\acute{a}x\ talud}$ = Cortante máximo del flujo en el talud (N/m²)

K_1 = Coeficiente dependiente de la inclinaci3n del talud (Z)

τ_p = Cortante de flujo permisible para que un revestimiento o técnica de bioingeniería se considere aceptable (N/m²)

SF = Factor de seguridad (1-1.5)

El método contempla también la mayoración por curva (Ecuación 21), la longitud de protección (Ecuación 22), y la sobre-elevación adicional de la lámina de agua debida al peralte (Ecuación 23).

$$\tau_{curva} = K_{curva} \cdot \tau_{m\acute{a}x\ lecho} \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 21)$$

$$Lp = \alpha \cdot \left(\frac{Rh^{7/6}}{n} \right) \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 22)$$

$$\Delta d = \frac{V^2 \cdot B}{g \cdot Rc} \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 23)$$

τ_{curva} = Cortante de flujo como consecuencia de un tramo en curva (N/m²)

K_{curva} = Coeficiente que relaciona el cortante de flujo con la curvatura (ver Young 1996)

Lp = Longitud de protección (m)

Rh = Radio hidráulico (m) = S_m (superficie mojada) / P_m (perímetro mojado)

α = Constante de conversión de unidades, 0,74 (SI) y 0,60 (CU)

n = Coeficiente de Manning para el lecho

Δd = sobre-elevación adicional debido al peralte (m)

V = velocidad media del flujo (m/s)

B = Anchura de la superficie libre (m)

g = Aceleración debido a la gravedad (m/s²)

Rc = Radio de curvatura (m)

Como única limitación debe citarse que el método está diseñado para una sección trapezoidal, lo que condiciona su aplicación en cauces naturales.

Selección final del método de cálculo: estos 5 métodos de estimación de cortantes se aplicaron a varias secciones representativas donde se simularon caudales en el rango de la máxima crecida ordinaria. Para todas las secciones estudiadas, los métodos que presentan cortantes de mayor magnitud son el 3 y el 5. Se descarta el método n° 2 (por sus dificultades de estimación) y el método n° 4 (por presentar los resultados más bajos del conjunto). Una revisión final de los métodos 3 y 5 permitió decantarse por el método 5 apoyándose en los siguientes criterios:

- Cumple todas las consideraciones expuestas en la Tabla 2 con la excepción de que su estudio ha sido probado en cauces naturales, circunstancia que comparten todos los métodos estudiados.
- No precisa datos de partida de difícil adquisición
- El método de cálculo propiamente dicho no presenta limitaciones para su sistematización en Microsoft Excel. Una consideración final sería que las fórmulas que utiliza dicho método no son excluyentes para ningún tipo de cauce natural ya que tiene en cuenta el factor de seguridad, cualquier componente horizontal de inclinación (Z) y el efecto de la curvatura con su longitud asociada aguas abajo y la elevación de la superficie del agua.
- Su aplicación a los tramos de ensayo no ha presentado, incoherencias o resultados cuestionables
- Los resultados proporcionados son en general (tanto en máximos como en distribución) los más elevados de los 5 métodos probados, lo que nos posiciona del lado de la seguridad

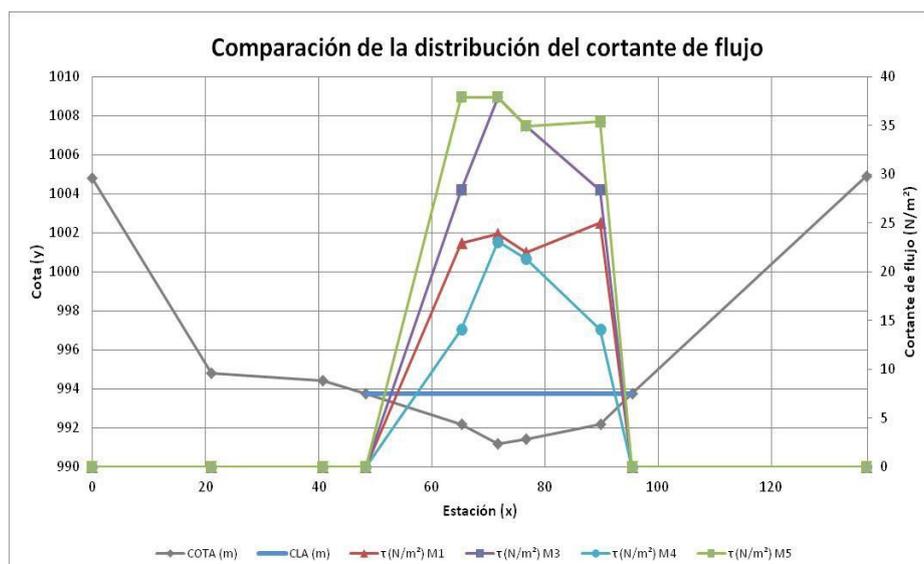


Figura1. Comparación de los valores obtenidos del cortante del flujo en las cinco metodologías estudiadas. CLA (m): Cota de lámina de agua; $\tau(N/m^2)Mi$: cortante del flujo estimado por el Método i ($i=1,..5$)

4. Resultados

Como resultado de este trabajo se presenta la aplicación informática desarrollada en Microsoft Excel para la selección de técnicas de bioingeniería. El protocolo consta de las siguientes fases:

a) Fase previa: modelización con HEC-RAS

Esta modelización tiene por objetivo obtener para el caudal de diseño (generalmente el caudal generador o de la máxima crecida ordinaria) las variables de entrada en la aplicación informática. Partiendo de la geometría del tramo de estudio y para ese caudal, el usuario deberá obtener tras la modelización hidráulica para cada sección en estudio, los datos siguientes:

- Coordenadas (X,Y) de los puntos de la sección (m)
- Cota de lámina de agua (CLA, m)
- Pendiente del cauce o línea de energía (S_e , m/m)
- Calado máximo (D, m)
- Área del flujo en el lecho y para cada margen (A, m²)
- Perímetro mojado en el lecho y para cada margen (P, m)
- Velocidad media en las subsecciones consideradas (V, m/s)
- Coeficiente de Manning (n).

b) Entrada de datos en la aplicación

El usuario deberá introducir como datos de partida, los datos de campo y las variables obtenidas con HEC-RAS que se muestran en la Figura 2: coordenadas (X,Y) de los puntos de la sección, identificando los correspondientes a la superficie mojada; cota de lámina de agua (CLA); coordenadas de inicio de ambos taludes; pendiente de la línea de energía (Se); área del flujo de la sección (A); perímetro mojado (P); el coeficiente de Manning (n); velocidad media (V); y radio de curvatura (Rc). También deben introducirse las velocidades medias discretizadas en subsecciones.

ENTRADA DE VARIABLES

Geometría de la sección transversal

Estación (x)	Cotas (y)
0	26.6395
3.048	25.3898
4.572	24.5364
7.3152	23.622
9.144	22.0675
10.0584	20.9398
11.8872	20.2082
15.24	19.3243
18.288	19.2634
19.812	20.5435
21.336	22.159
22.5552	24.0487
24.0792	24.2621
25.2984	25.847
26.2128	27.1272

Cota de lámina de agua (CLA)

Estación (x)	Cota (y)
Márgen izq.	8
Márgen der.	22

Punto donde termina el lecho

Estación (x)	Cota (y)
Márgen izq.	11.8872
Márgen der.	19.812

Geometría de la superficie mojada

Estación (x)	Cotas (y)
9.144	22.0675
10.0584	20.9398
11.8872	20.2082
15.24	19.3243
18.288	19.2634
19.812	20.5435
21.336	22.159

Variables de entrada

Peso específico del agua con sedimentos (Y):	10000	N/m ³
Pendiente del Cauce (S):	0.001231	m/m
Área del flujo (m ²):	36.1	m ²
Perímetro mojado (m):	16.63	m
Coeficiente de Manning en el lecho (n):	0.025	
Velocidad media del flujo (V):	2.35	m/s
Radio de Curvatura (Rc):	50	m

Figura 2. Datos de entrada

c) Cálculos realizados por la aplicación

A partir de los datos anteriores la aplicación calcula: anchura de la superficie libre (B, m); distribución de calados (D_i , m); calado máximo (D, m); radio hidráulico (Rh, m); relación B/D; relación Rc/B; componente horizontal de inclinación del talud (Z). Además y aplicando el método 5 obtiene el cortante medio de flujo, los cortantes máximos en lecho y en talud y su distribución a lo largo de la sección transversal, el cortante en curva, la longitud de protección y la sobre-elevación de la lámina de agua. Algunos de estos resultados se muestran en las Figuras 3 y 4.

Resultados de la geometría de la sección transversal

Radio hidráulico (Rh):	2.17	m
Anchura de la superficie libre (B):	14	m
Calado máximo (D):	3.74	m
Relación B/D:	3.75	
Relación Rc/B:	0.17	
Longitud de protección (Lp):	73.12	m
Sobre-elevación adicional (Δd):	0.16	m

Figura 3. Resultados para la sección transversal

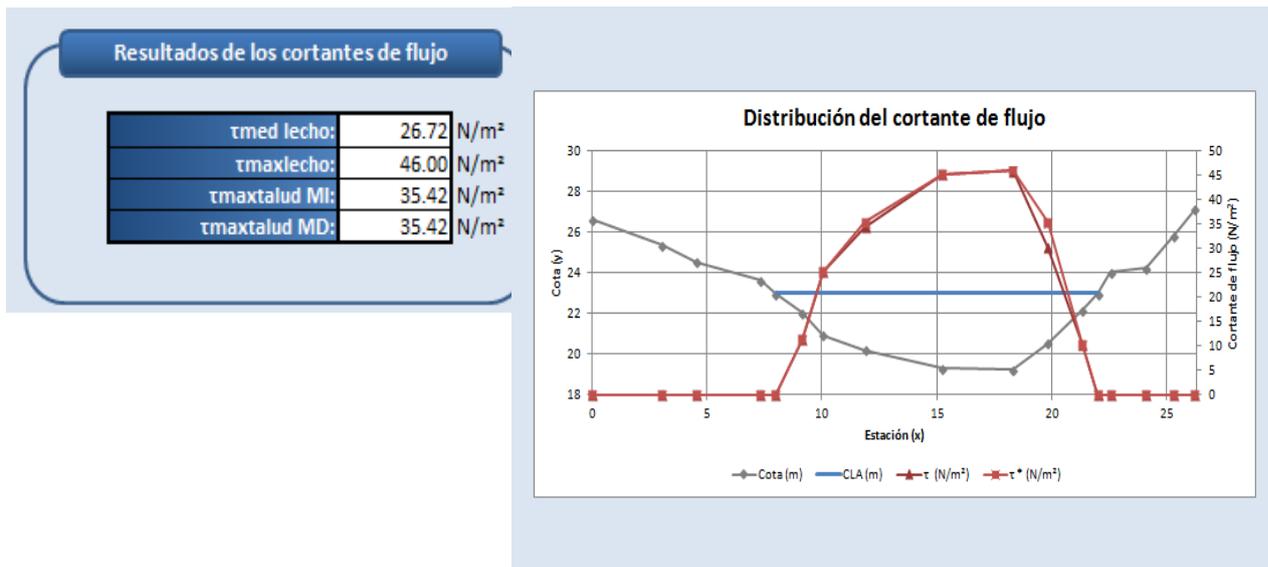


Figura 4. Resultados de la distribución de cortantes en lecho y talud

d) Selección de la técnica de bioingeniería

Una vez obtenidos los resultados de la distribución de velocidades del flujo (v_i), de la distribución de los cortantes del flujo (τ_i) y la componente horizontal de inclinación de los taludes (Z), el usuario puede realizar una consulta a la base de datos de las técnicas de bioingeniería. La consulta de los rangos de estos parámetros proporcionará al usuario las técnicas de bioingeniería que más se ajustan a las sollicitaciones evaluadas. Dado que se conoce la distribución de cortantes y que la velocidad está discretizada en subsecciones, la consulta puede realizarse también a este nivel de detalle.

De entre las técnicas preseleccionadas por la aplicación, será el usuario quién deba realizar la selección final basándose en motivos ecológicos, económicos o paisajísticos.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para una sección en el río Urumea para el caudal de la máxima crecida. Los resultados se ofrecen en subsecciones de izquierda a derecha en la imagen.

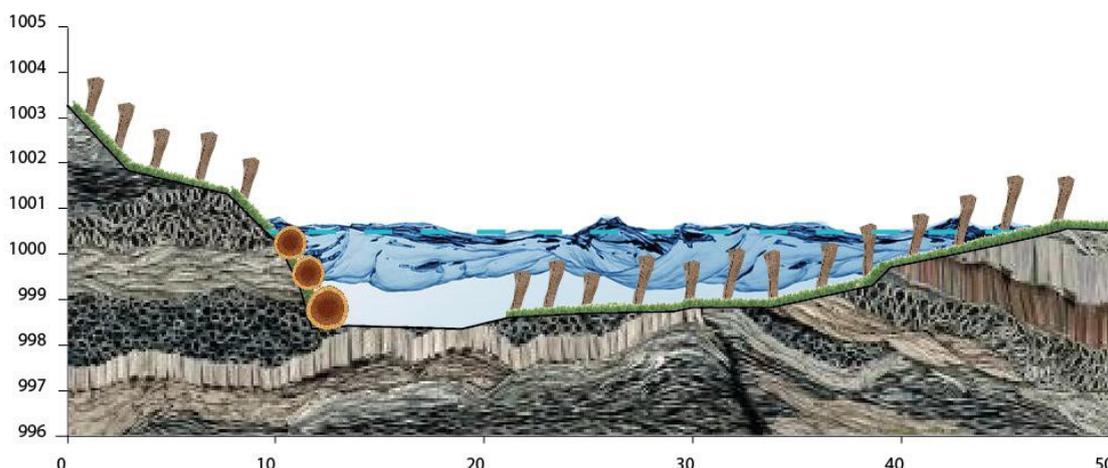


Figura 5. Resultados de la selección de la técnica de bioingeniería más adecuada a una sección del río Urumea.

- Subsección 1: el valor del cortante del flujo es igual a cero ya su cota supera la superficie libre. En esta subsección podría implantarse cualquier tipo de bioingeniería según la modelización hidráulica realizada. Como solución, se ha propuesto el uso de estaquillado de especies de sauces pertenecientes a la zona o región ecológica.
- Subsección 2: el rango de valores del cortante de flujo va de 0 N/m² a 21.5 N/m². Como solución, se ha propuesto el uso de técnicas de ingeniería naturalística como hileras de tocones, revestimiento de árboles, o fajinas vivas. Todas estas técnicas superan el esfuerzo cortante del lecho aun siendo la zona exterior de una curva.
- Subsección 3: el rango de los valores del cortante del flujo oscila entre 7 y 11 N/m². Como solución podría utilizarse un geotextil con estaquillado de especies de sauce pertenecientes a la misma zona de la obra que soporten periodos de tiempo en los que la especie quede parcial o totalmente sumergida.
- Subsección 4: en esta última zona el rango del cortante de flujo corresponde con 0-7 N/m². Como solución, se propone utilizar la misma técnica que en la subsección 1, el estaquillado de especies de sauce pertenecientes a la zona de la obra pero con una especie diferente.

5. Discusión

- Referente a la base de datos, la falta de información bien estructurada y contrastada ha sido el factor más limitante a la hora de la realización de este trabajo, siendo conscientes los autores de que aún queda pendiente una mayor investigación sobre las características y limitaciones técnicas que presenta cada técnica de bioingeniería, en especial las de carácter hidráulico.
- Referente a la metodología de cálculo del cortante del flujo: la revisión realizada a las publicaciones científicas en el tema, así como el análisis contrastado de las principales metodologías existentes, ha permitido discriminar un procedimiento de cálculo propuesto por Kilgore & Cotton (2005), que si bien fue inicialmente diseñado para canales artificiales, presenta suficiente versatilidad para su adaptación a cauces naturales.
- Referente a la aplicación de cálculo propiamente dicha: no se han podido sistematizar todos los procesos de cálculo debido a la diversidad de tipologías de las secciones naturales. Esta circunstancia motiva que el usuario deberá tomar parte en el proceso, introduciendo manualmente algunos datos. Actualmente la aplicación se presenta en Microsoft Excel, siendo conscientes de ciertas carencias como la falta de ventanas emergentes donde el usuario introduzca las variables de entrada o que la aplicación de como respuesta otra ventana emergente donde refleje las técnicas de bioingeniería más eficaces según las características del tramo fluvial de estudio. Se espera que con el tiempo pueda perfeccionarse la herramienta e implementar nuevas técnicas y factores.
- Referente a su aplicabilidad: la aplicación presentada se ha aplicado con éxito a varios tramos fluviales de distintas características permitiendo una discriminación por subsecciones de las técnicas más idóneas.

6. Conclusiones

La aplicación informática que se presenta desarrollada en Microsoft Excel permite la selección de la técnica de bioingeniería más adecuada a partir de un conjunto de variables de entrada definitorias de las condiciones hidráulicas, topográficas y ambientales del tramo de actuación.

Los interesados en dicha aplicación pueden ponerse en contacto con alvaromzfz@gmail.com

7. Bibliografía

FUNDACIÓN NUEVA CULTURA DEL AGUA, 2014 [consulta 20-12-2014]. Disponible en: <http://www.fnca.eu>

JAVID, S., & MOHAMMADI, M.; 2012. Boundary shear Stress in a Trapezoidal Channel. I.J.E. International Journal of Engineering. Vol. 25, No. 4, (October 2012) 323-331. Disponible en www.ije.ir

KILGORE, R. T. & COTTON, G. K.; 2005. Design of Roadside Channels with Flexible Linings. Hydraulic Engineering. Circular Number 15, Third Edition. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration

LANE, E.W.; 1952. Chapter 8 "Threshold Channel Design. En USDA. Stream Restoration Design National Engineering Handbook 654. Disponible en www.nrcs.usda.gov

MAYS, W.L.; 1999. Hydraulic Design Handbook. McGraw-Hill McGraw-Hill Education. 1024 págs. New York.