

Cálculo de la fuerza límite de arrastre de un torrente a partir del funcionamiento real de diques de corrección

Calculation of the Drag Force of a Torrent from the Actual Functioning of Correction Dams

Ignacio Pérez-Soba Díez del Corral^{1*}

Resumen

Las pendientes realmente obtenidas en los sedimentos retenidos por diques u otros represamientos naturales o artificiales situados en los cauces torrentiales, ofrecen una excepcional oportunidad de verificación de los modelos y fórmulas de cálculo de las características hidráulicas de dichos cauces. Además, permiten también calcular dichas características a partir del resultado comprobado de la acción de la naturaleza sobre los diques. Ya propusimos, de hecho, un método para el cálculo de la pendiente de compensación mediante comparación con pendientes realmente obtenidas. Este artículo presenta otro método comparativo que permite calcular de manera aproximada, pero rápida y sencilla, la fuerza límite de arrastre en un punto de un torrente, a partir de la medición de las pendientes de compensación realmente obtenidas en ese cauce u otros análogos. Se usan métodos y fórmulas de hidráulica general, y en particular las hipótesis de García Nájera sobre las condiciones de la pendiente de equilibrio. Este método es independiente de la granulometría del lecho, por lo que resulta más sencillo, y está más basado en la evidencia, que las fórmulas basadas solamente en experimentos de laboratorio.

Palabras clave: diques, hidrología forestal, torrents, sedimentos, hidráulica, erosión.

Abstract

The slopes actually obtained in the sediments retained by dams and other natural and artificial damming located in the torrential channels, offer an exceptional opportunity to verify the models and formulas for calculating the hydraulic characteristics of channels. It also lets us calculate those characteristics from the proven result of the action of nature on the dams. We have already proposed, in fact, a method for calculating the compensation slope by comparing the slopes actually obtained. This paper presents another comparative method that allows to calculate approximately, but fast and in a simple way, the drag force limit at a given point of a torrent through the measurement of the compensation slopes actually obtained in that channel or analogous ones. Methods and formulas of general hydraulics are used, and in particular the García Nájera's assumptions about the conditions of the equilibrium slope. This method is independent of the granulometry of the torrent bed, being simpler and resting on evidence rather than formulas drawn from laboratory testing.

Keywords: dams, forest hydrology, torrents, sediments, hydraulics, erosion.

1. INTRODUCCIÓN

Para proyectar la corrección de un curso torrential de agua, el estudio de cada tramo del cauce debe incluir el cálculo de las magnitudes hidráulicas fundamentales, que permitirán, junto con los datos topográficos de la zona y los derivados del estudio hidrológico, determinar las condiciones en que las aguas circulantes causan la ablación, transporte y depósito de los materiales sólidos tanto del cauce como de las laderas inmediatas a él. En particular, la magnitud cuyo conocimiento resulta básico es la fuerza o la tensión límite de arrastre (o bien, de su magnitud correlativa, la velocidad límite del flujo), que se define como aquella que inicia el movimiento de los materiales en la solera del cauce. Conocer la fuerza o la velocidad límites permite

a su vez saber las condiciones en que (en general) la circulación del agua en el tramo abandonará el régimen hidráulico normal para seguir uno torrential: cuando la corriente tenga una fuerza de arrastre que supere los valores límites, se producirá erosión y transporte; si tiene una fuerza inferior, se producirá deposición de los materiales acarreados, según el esquema clásico de Hjulstrom (1935) (figura 1).

Para el cálculo de los valores límites de arrastre, se han desarrollado fórmulas muy variadas, desde el siglo XIX, siendo la primera la de Du Boys (1879). Según Wohl (2013), estas fórmulas pueden agruparse en cuatro familias o tipos, según la magnitud que usen para el cálculo: la tensión de arrastre sobre el lecho (por ejemplo, la propia de Du Boys); el caudal -la típica es la de Schoklitsch (1934)-; una función estocástica, como la de Einstein (1950) o la potencia hidráulica, como la de Bagnold (1980). Ahora bien, sin negar el valor de todas estas fórmulas, los estudios realizados acerca de su capacidad de predicción revelan sus limitaciones: Bettess (2002) y Lauchlan y May (2002), tras revisar las metodologías de uso más extendido, concluyen que todas incluyen parámetros de estimación subjetiva y además no tienen en

* Autor de contacto: iperezs@aragon.es

¹ Doctor Ingeniero de Montes. Gobierno de Aragón. Servicio Provincial de Desarrollo Rural y Sostenibilidad de Zaragoza. Paseo de María Agustín, 36. 50071 Zaragoza (España).

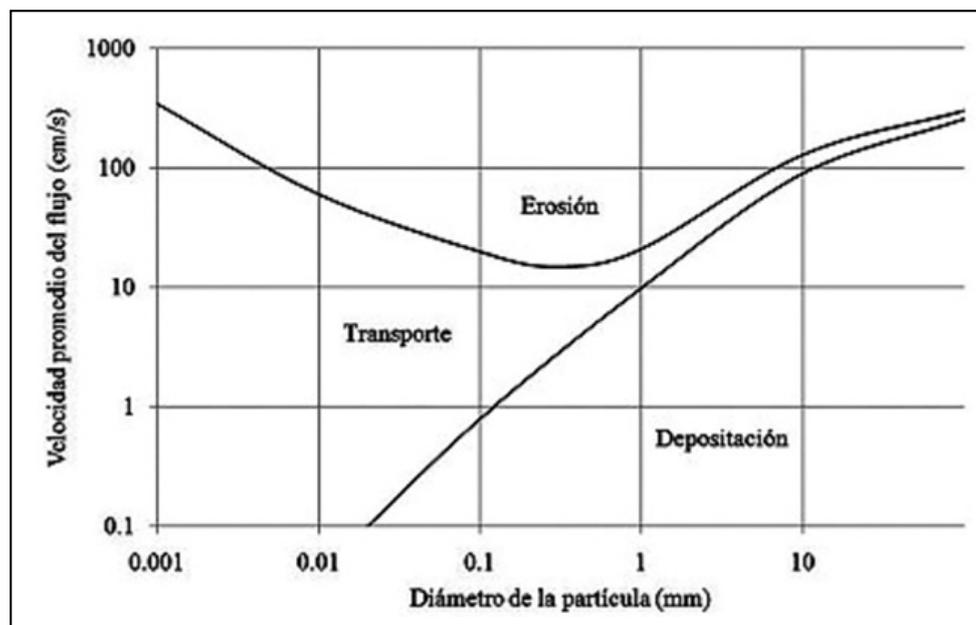


Figura 1. Diagrama de Hjulstrom (1935), que correlaciona la velocidad límite para desprender, transportar o depositar partículas de suelo o del lecho, según su diámetro, para flujos de agua.

cuenta muchos aspectos de la dinámica fluvial, de modo que sus predicciones no resultan fiables salvo como orden de magnitud. En este sentido, Carson y Griffiths (1987) subrayaron los problemas que causa aplicar fórmulas muy antiguas, que se han repetido de generación en generación, sin comprobar cuáles fueron sus hipótesis y limitaciones originales, o sin distinguir entre sus diferentes versiones.

Las fórmulas clásicas presentan además otra limitación que ha de tenerse especialmente en cuenta en los cauces torrenciales: la mayoría de ellas se han desarrollado a partir de experimentos de laboratorio, sobre la base de unas relaciones concretas entre las variables hidráulicas, las condiciones del lecho y las tasas de transporte de material, y bajo condiciones de flujo uniformes. Tienen poco que ver, por tanto, con la realidad, y la diversidad, de los torrentes. Incluso las fórmulas que sí se basan en mediciones reales (como la de Parker *et al.*, 1982), se refieren a cursos de agua de tipo fluvial, cuya hidrología presenta diferencias muy marcadas con la de los torrentes, y en especial con los de tipo mediterráneo, ya que la hidrología y el transporte de los sedimentos de los cauces efímeros no puede ser predicha con fiabilidad por la extrapolación de la hidrología fluvial de regiones húmedas (Scott, 2006; McMahon, 1979).

Aun así, estas fórmulas clásicas se siguen usando porque, aparentemente, no hay muchas más opciones: la calibración y el desarrollo de nuevas fórmulas o modelos debieran basarse en la medición real y continua del transporte de fondo de cursos de agua, con un rango de condiciones hidráulicas y sedimentológicas lo suficientemente amplio como para obtener conclusiones estadísticamente significativas, y, como señalan García y Sala (1998), las dificultades técnicas para hacer estas mediciones son grandes. Y esto es aún más acusado en los cursos torrenciales, pues son especialmente difíciles de estudiar de forma cuantitativa (sobre todo los efímeros), y en realidad lo poco que de ellos se conoce procede, esencialmente, de la descripción de fenómenos excepcionales (López Cadenas de Llano, dir., 1998). Ya uno de los principales fundadores de la hidrología forestal en España, el Ingeniero de Montes Benito

Ayerbe Aísa (1872-1917), subrayaba con estas palabras la importancia de estudiar detenidamente la acción real de los torrentes para comprender mejor la situación de torrencialidad a la que se enfrenta el proyectista: “en estos torrentes no hay proyecto posible de corrección a priori; hay que corregirlos como ellos indiquen; hay que estudiarlos constantemente” (citado en Pérez-Soba, 2018).

Ahora bien, como ya indicamos en otro trabajo (Pérez-Soba, 2002a), la Administración Forestal española, desde la creación de las Divisiones Hidrológico-Forestales en 1901, construyó miles de hidrotecnias de todo tipo (especialmente diques transversales) en los cursos torrenciales, algunas de las cuales llevan más de un siglo funcionando de manera continuada en situaciones reales de torrencialidad (figura 2). Y por tanto, su estudio y análisis ofrecen grandes potencialidades para el avance de la hidrología forestal, en especial en cuanto a la comprensión del fenómeno torrencial y en cuanto a la mejora de la redacción de proyectos de corrección.

Modernamente, cada vez más autores están explotando las posibilidades de investigación que ofrecen los diques forestales que llevan décadas funcionando: Romero (2008) y



Figura 2. Dique de mampostería gavionada enlucida de mortero, construido en 1956 en el barranco de Bijuesca o de Carrabijuesca (Torrijo de la Cañada, Zaragoza) por la Sexta División Hidrológico-Forestal del Patrimonio Forestal del Estado. Está completamente colmatado de sedimentos, que han adquirido la pendiente de compensación y están consolidados por vegetación espontánea (Pérez-Soba, 2015: 252).

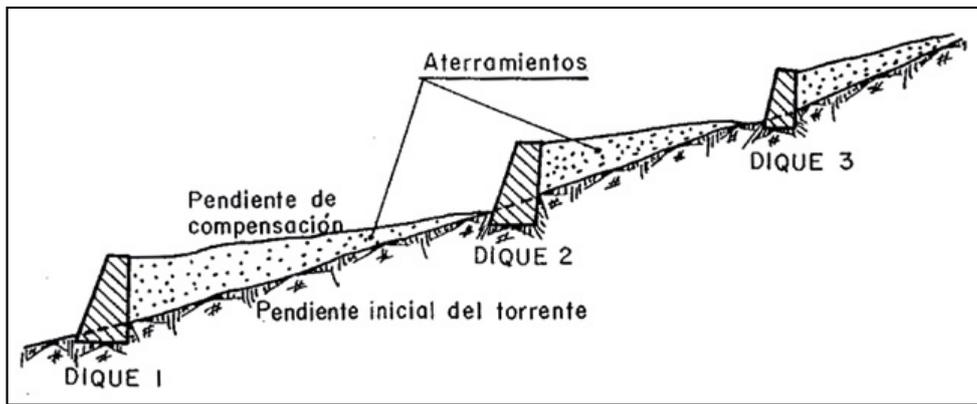


Figura 3. Esquema longitudinal de la formación de la pendiente de compensación en los acopios de sedimentos retenidos por diques transversales de corrección torrencial (Mintegui y López, 1990: 61).

Hernández et al. (2004) destacan cómo los sedimentos retenidos por los diques constituyen una muy valiosa fuente de información para cuantificar la erosión en las cuencas vertientes; y Martínez de Azagra et al. (2002) y Ramos et al. (2013) subrayan la necesidad de evaluar los efectos hidrológicos reales de los diques. En esa línea, propusimos en su día (Pérez-Soba, 2002b) una metodología para el cálculo de la pendiente de compensación por comparación a partir de datos de pendientes alcanzadas en la realidad en diques ya aterrados (figura 3). Pretendemos ahora, por tanto, hallar una metodología similar para el cálculo de la fuerza límite de arrastre, que supere las limitaciones de las fórmulas clásicas.

2. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es hallar, mediante el desarrollo matemático de la teoría de la pendiente de compensación propuesta por García Nájera (1962), un método de cálculo que permita hallar, de manera aproximada, la fuerza límite de arrastre en un punto de un torrente, a partir de la medición de las pendientes de compensación realmente obtenidas en diques previamente construidos en ese mismo cauce, u otros análogos. Se busca un método que sea sencillo y práctico para aplicar, en proyectos de corrección, las conclusiones que se puedan obtener del estudio

del funcionamiento de las hidrotecnias de corrección sometidas durante años a los fenómenos torrenciales.

3. METODOLOGÍA

Las hipótesis básicas en las que se basa el método son: 1) que en la pendiente de equilibrio que realmente se ha producido se dan las circunstancias descritas por García Nájera (1962), que iremos recordando a lo largo del desarrollo matemático; y 2) que nos hallamos en un cauce de gran anchura, en el que podamos aceptar con escaso error que el calado y el radio hidráulico se igualan. Asumir la primera hipótesis conlleva también aceptar la relación descrita por Strickler (1923) entre el radio hidráulico y el coeficiente C de Manning.

Cuando se desea hallar la pendiente de compensación según la teoría de García Nájera, se calcula el valor de la tensión límite de arrastre mediante la fórmula de Schoklistch, usando distintas características de los materiales del lecho: coeficiente de forma, volumen medio y volumen de los materiales mayores (García Nájera, 1962). Nuestro propósito es aplicar dicho método a la inversa: partiendo como dato de la pendiente de compensación realmente alcanzada, calcularemos la tensión límite (y por tanto la fuerza límite) que la ha producido, mediante la metodología que se expresa gráficamente en la figura 4.

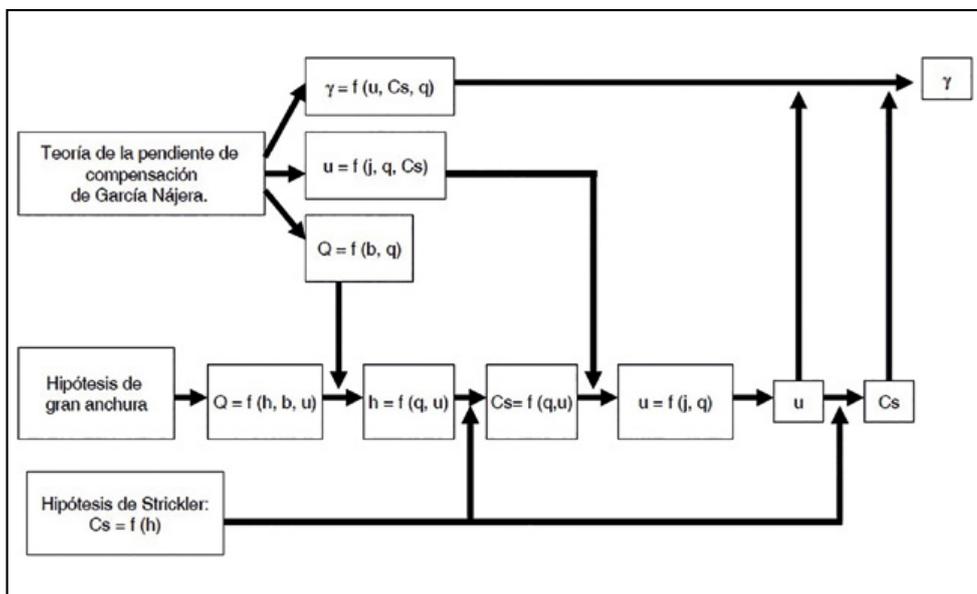


Figura 4. Metodología propuesta en este artículo para el cálculo de la fuerza límite a partir de una pendiente de compensación realmente alcanzada en un dique colmatado de sedimentos.

En dicho esquema, el significado de las variables es:

γ : tensión límite de arrastre (m).

b : ancho medio del cauce (m).

h : calado del agua en la sección considerada (m).

u : velocidad de las aguas con materiales en suspensión (m/s).

j : pendiente de compensación realmente alcanzada en un dique colmatado de sedimentos.

$q = g \cdot Q / 2 \cdot b$ (según la teoría de García Nájera), en donde Q es el caudal (que para nosotros será el generador del lecho), g la aceleración de la gravedad y b el ancho medio del cauce, como se ha indicado antes. De ahí se deduce que $Q = 2qb/g$.

C (coeficiente de Manning basado en la fórmula de Strickler) = $n \cdot h^{1/6}$. Se usa la simplificación, antes comentada, de que el calado y el radio hidráulico se igualan, es decir, $h = R$. En esta expresión, n es el coeficiente de Strickler, que está tabulado para distintas situaciones (Hager, 2010), siendo frecuente el uso de $n=30$ para cauces de gran rugosidad, como suelen ser los torrenciales.

C_s (coeficiente modificado de Manning) = $C \cdot \alpha$, siendo a su vez α el coeficiente de reducción del rozamiento de las aguas con suspensiones con respecto a las limpias, cuyo valor es dado por García Nájera en función del peso específico del agua limpia (ω_0), de la proporción de sedimentos incorporados a la corriente (χ ; el propio autor recomienda usar el valor de $\chi=0,10$), y del peso específico de dichos sedimentos (δ), según la siguiente expresión:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega_0^3}{(1 + \chi) \cdot (\omega_0 + \chi\delta)^3}}$$

4. RESULTADOS

Como es sabido, la pendiente de compensación según García Nájera se calcula mediante la siguiente fórmula (g es la aceleración de la gravedad):

$$j = \frac{g u^3}{2 C_s^2 q} \quad [1]$$

Esta expresión deriva a su vez de que se cumpla la siguiente ecuación:

$$u^7 + qu^4 - 3\xi^2 q = 0 \quad [2]$$

El valor de ξ en la fórmula [2] se relaciona con el coeficiente modificado de Manning de la siguiente forma (siendo γ la tensión límite de arrastre):

$$\xi = C_s^2 \gamma \quad [3]$$

Comenzamos introduciendo el valor de ξ que figura en [3] dentro de la expresión [2], y despejando la incógnita buscada, esto es, la tensión límite, que nos quedará en función de un valor que podemos calcular con los datos disponibles (q), y de dos que desconocemos aún (u y C_s , que depende del calado):

$$u^7 + qu^4 - 3C_s^4 \gamma^2 q = 0 \Rightarrow u^4(u^3 + q) = 3C_s^4 \gamma^2 q \Rightarrow \gamma = \left(\frac{u}{C_s}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{u^3 + q}{3q}} \quad [4]$$

Para el cálculo de u , y tal como hemos expresado en la figura 3, despejaremos en primer lugar su valor en la fórmula de García Nájera (1):

$$j = \frac{g u^3}{2 C_s^2 q} \Rightarrow u = \left(\frac{2 \cdot j \cdot C_s^2 \cdot q}{g}\right)^{1/3} = \left(\frac{2 \cdot j \cdot q}{g}\right)^{1/3} \cdot C_s^{2/3} \quad [5]$$

Para poder resolver la expresión [5], es preciso que la expresión para el cálculo de C_s no esté en función del calado, sino de la velocidad, de modo que tengamos una sola incógnita en la ecuación. Para ello, comenzaremos por relacionar dos expresiones matemáticas del caudal aplicables al caso analizado: la que se deriva de la teoría de García Nájera ($Q = 2qb/g$) y la que resulta de la hipótesis que hemos aceptado de un caudal ancho ($Q = b \cdot h \cdot u$). De este modo:

$$Q = b \cdot h \cdot u \Rightarrow h = \frac{Q}{b \cdot u} = \frac{\left(\frac{2qb}{g}\right)}{b \cdot u} = \frac{2q}{g \cdot u} \quad [6]$$

Introducimos ahora, en la fórmula de Strickler para el coeficiente de Manning, el valor del calado que acabamos de obtener en [6]:

$$C = n \cdot h^{1/6} = n \cdot \left(\frac{2q}{g \cdot u}\right)^{1/6} \Rightarrow C_s = \alpha \cdot n \cdot \left(\frac{2q}{g \cdot u}\right)^{1/6} \quad [7]$$

Por otro lado, si despejamos la velocidad en la fórmula de la pendiente de compensación [1] resulta lo siguiente:

$$j = \frac{g u^3}{2 C_s^2 q} \Rightarrow u = \left(\frac{2 \cdot j \cdot C_s^2 \cdot q}{g}\right)^{1/3} = \left(\frac{2 \cdot j \cdot q}{g}\right)^{1/3} \cdot C_s^{2/3} \quad [8]$$

Introduciendo ahora en la expresión [8] el valor de C_s en función de q y de u obtenido en [7], resulta ya una ecuación con una sola incógnita (u):

$$u = \left(\frac{2 \cdot j \cdot q}{g}\right)^{1/3} \cdot C_s^{2/3} = \frac{2^{1/3} \cdot j^{1/3} \cdot q^{1/3}}{g^{1/3}} \cdot \frac{\alpha^{2/3} \cdot n^{2/3} \cdot 2^{1/9} \cdot q^{1/9}}{g^{1/9} \cdot u^{1/9}} \Rightarrow \\ \Rightarrow u = \left(\frac{2^{4/9} \cdot j^{1/3} \cdot q^{4/9} \cdot \alpha^{2/3} \cdot n^{2/3}}{g^{4/9}}\right)^{9/10}$$

Por tanto:

$$u = \frac{2^{2/5}}{g^{2/5}} \cdot n^{3/5} \cdot j^{3/10} \cdot \alpha^{3/5} = 0,5294 \cdot n^{0,6} \cdot j^{0,3} \cdot \alpha^{0,6} \quad [9]$$

Para el valor de $n=30$ (usado frecuentemente, como hemos dicho, para cauces rugosos), la expresión anterior quedaría:

$$u = 4,074 \cdot j^{0,3} \cdot \alpha^{0,6} \quad [10]$$

Con las expresiones [9] o [10] ya podemos calcular la velocidad límite en función de valores conocidos, y posteriormente calcular C_s mediante la expresión [7], y con ambos valores (u y C_s), calcular la tensión (γ , de manera inmediata, la fuerza) límite mediante la expresión [4].

5. DISCUSIÓN

Este método presenta, para el cálculo de la fuerza límite, las siguientes ventajas con respecto a las fórmulas clásicas basadas en datos experimentales:

1. Todas las fórmulas clásicas necesitan en mayor o menor medida del conocimiento de las caracterís-

ticas de los materiales transportados, y ello (al menos en los torrentes de tipo pirenaico o alpino) no es sencillo, por la dificultad para determinar, de entre los materiales de mayor tamaño que se hallan en el cauce, cuáles son los que han sido movilizados y transportados por las aguas y cuáles tienen otra procedencia: desplomes de las laderas, aportaciones de barrancos tributarios, o simplemente materiales del propio cauce que han sido puestos al descubierto por la erosión progresiva. Por otra parte, el propio Schoklistch señaló que su fórmula sólo es válida para materiales con tamaños máximos comprendidos entre 0,15 y 0,30 m³, volúmenes que con mucha frecuencia se superan en los torrentes pirenaicos. La metodología que proponemos en este trabajo es independiente de la granulometría del lecho, ya que parte de un valor real de pendiente de compensación ya alcanzada.

2. El método que aquí se propone parte de datos medidos tras la actuación durante décadas de la naturaleza, soslayando los ya comentados problemas que existen para la medición continua y estadísticamente significativa de los fenómenos torrenciales.

Debe señalarse también, y no obstante, que este método debe aplicarse dentro de la validez de las hipótesis en las que se basa:

1. Se trata de un simple desarrollo numérico de la teoría de García Nájera sobre la pendiente de compensación, que se asume en su integridad en este artículo, salvo la mínima corrección de usar el coeficiente de Manning en lugar del de Bazin, modificación muy frecuente en la actualidad, y que se justifica por el mejor conocimiento del significado físico y el rango de variación de su coeficiente “n” (Mintegui, 1993). La teoría de García Nájera, a pesar de los años transcurridos desde que se formuló, y de que sin duda presenta ligeras imprecisiones y algunos aspectos mejorables (Martínez de Azagra, 1993) continúa siendo muy usada, incluso para las aplicaciones informáticas actuales (Tarifa et al., 2010). Ello se debe en gran parte a que cuenta con unas sólidas bases físico-matemáticas, a que huye del empirismo, y a que es sencilla y práctica, puesto que se basa en coeficientes y fórmulas de hidráulica general muy conocidas y aceptadas, disponibles en la bibliografía de referencia. Ello está muy acorde con los objetivos planteados para este artículo de ofrecer un método de cálculo aproximado, sencillo y práctico.
2. La hipótesis de cauces anchos no resulta aplicable a todos los cursos torrenciales (presenta particulares dificultades en el caso de los cauces con una fuerte incisión lineal); ni a todos los tramos de estos cursos.

6. CONCLUSIONES

Se proponen las siguientes conclusiones:

- El estudio de cuál ha sido el funcionamiento de las hidrotecnias de corrección (especialmente, de los di-

ques transversales) que llevan años instaladas en los cursos torrenciales parece una interesante vía de investigación para avanzar en la comprensión del fenómeno torrencial y para mejorar la redacción de los proyectos de corrección de ese tipo de cauces.

- En particular, el desarrollo de metodologías que se basen en datos realmente obtenidos en dichos diques o hidrotecnias permitiría superar algunas de las limitaciones de las fórmulas basadas en condiciones experimentales, o en cauces fluviales, y es una buena alternativa para evitar las serias dificultades prácticas que presenta la medición del fenómeno torrencial.
- El método propuesto en este artículo permite el cálculo aproximado de la fuerza límite a partir del dato de la pendiente de compensación realmente alcanzada en un dique ya colmatado que esté situado en un cauce que tenga condiciones análogas o parecidas al que interese.
- Este método presenta la ventaja de ser independiente de las características de los materiales del lecho, lo que simplifica la redacción de los estudios y proyectos, y también evita los problemas que hay, sobre todo en torrentes pirenaicos, para identificar el origen de los materiales que se hallen en los lechos, puesto que no todos ellos proceden de transporte por los caudales líquidos.
- La validez del método está ligada a la de la teoría de la formación de la pendiente de compensación propuesta por García Nájera, y es aplicable (al menos con la formulación aquí expuesta), sólo a cauces que puedan considerarse anchos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bagnold, R.A. (1980). An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. *Proceedings of the Royal Society of London*, N° 1751, pp. 453-473.
- Bettess, R. (2002). A review of predictive methods for general scour. *First International Conference on Scour of Foundations*. College Station, Texas, USA: Texas A&M University, pp. 162-174.
- Carson, M.A., y Griffiths, G.A. (1987). Bedload transport in gravel channels. *Journal of Hydrology New Zealand*, 26(1): pp. 1-151.
- Du Boys, M.P (1879). Études du régime et l'action exercé par les eaux sur un lit à fond de graviers indefinimnet affouillable. *Annals des Ponts et Chaussées*, 5(18): pp. 141-195.
- Einstein, H.A. (1950). *The bed load function for sediment transportation in open channel flows*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture and Soil Conservation Service.
- García, C., y Sala, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas. Comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera. *Ingeniería del agua*, 5(1): pp. 59-72.
- García Nájera, J.M. (1962). *Principios de hidráulica torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes*. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.
- Hager, W.M. (2010). *Wastewater Hydraulics. Theory and Practice* (2nd Edition). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hernández, E., Martínez, M., y Romero, A. (2004). Método de determinación del volumen de sedimentos retenidos en diques de corrección hidrológica. En: Benito, G., y Díez, A. (eds.), *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología*. Madrid: Sociedad Española de Geomorfología y CSIC, pp. 201-210.

Hjulstrom, F (1935). The morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin of Geological Institute of Uppsala*, N° 25, pp. 221-527.

Lauchlan, C., y May, R. (2002). Comparison of general scour prediction equations for river crossings. *First International Conference on Scour of Foundations*. College Station, Texas, USA: Texas A&M University, pp. 184-197.

López Cadenas de Llano, F. (dir.) (1998). *Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, TRAGSA, TRAGASATEC y Mundi-Prensa.

Martínez de Azagra, A. (1993). Revisión e informatización del modelo de García Nájera para estimar la pendiente de compensación y el caudal generador del lecho. En: Silva-Pando, F.J., y Vega, G. (eds.), *Congreso Forestal Español Lourizán 1993*. Vigo (Pontevedra): Xunta de Galicia y Sociedad Española de Ciencias Forestales, Tomo III, pp. 97-102.

Martínez de Azagra, A., Fernández de Villarán, R., Seseña, A., Méndez, C.; Díez, J.M., Navarro, J., y Varela, J.M. (2002). Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, N° 13, pp. 171-181.

McMahon, T.A. (1979). Hydrological characteristics of arid zones. Hydrology of areas of low precipitation. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, N° 128, pp. 105-123.

Míntegui, J.A. (1993). Homenaje al Dr. J. M. García Nájera. En: Silva-Pando, F.J., y Vega, G. (eds.), *Congreso Forestal Español Lourizán 1993*. Vigo (Pontevedra): Xunta de Galicia y Sociedad Española de Ciencias Forestales, Tomo I, pp. 23-44.

Míntegui, J.A., y López, F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Vitoria: Gobierno Vasco.

Parker, G., Klingeman, P. C., y McLean, D.C. (1982). Bedload and size distribution in paved, gravelbed streams. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, N° 108, pp. 544-571.

Pérez-Soba, I. (2002a) Conclusiones hidrológicas de la evaluación de diques de corrección hidrológico-forestal. *Ingeniería Civil*, N° 126, pp. 93-98.

Pérez-Soba, I. (2002b). Consideraciones sobre el cálculo por comparación de la pendiente de compensación en la corrección hidrológico-forestal. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, N° 13, pp. 153-158.

Pérez-Soba, I. (2015). El régimen torrencial: restauración hidrológico-forestal. En: Santamarta, J.C., y Naranjo, J. (eds.), *Restauración de la cubierta vegetal y de espacios degradados en la Región de la Macaronesia*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes, pp. 225-278.

Pérez-Soba, I. (2018). La labor del Ingeniero de Montes Benito Ayerbe Aísa (1872-1917). Parte II: la defensa de la Estación Internacional de Canfranc contra aludes y torrentes. *La Estela*, N° 40, pp. 36-46.

Ramos, I., Navarro, J., Bartolomé, D., Díaz, V., y Mongil, J. (2013). Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). En: Montero, G.; Guijarro, M., et al (eds.), *Actas del Sexto Congreso Forestal Español*. Pontevedra: Sociedad Española de Ciencias Forestales. CD-Rom. 6CFE01-269.

Romero, M.A. (2008). Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de investigación geográfica*, N° 34, pp. 83-99.

Schoklitsch, A. (1934). Der geschiebtrieb und die geschiebefracht. *Wasserkraft Wasserwirtschaft*, N° 4, pp. 1-7.

Scott, S.H. (2006). Predicting sediment transport dynamics in ephemeral channels: a review of literature. *Coastal and Hydraulics Engineering Technical Notes*, 7(6): 8 pp.

Strickler, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. Bern Sekretariat d. eidg. Amtes f. Wasserwirtschaft.

Tarifa, E., Franco, S., Robredo, J.C., y Míntegui, J.A. (2010). Desarrollo de una aplicación informática para cálculos hidrológicos. *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, vol. 2010, pp. 409-414.

Wohl, E. (2013). *Mountain rivers revisited*. Colorado, USA: American Geophysical Union.