



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

## Cálculo por comparación de la fuerza límite de arrastre de un torrente

**Ignacio PÉREZ-SOBA DIEZ DEL CORRAL**



**GOBIERNO DE ARAGON**

Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad

Doctor Ingeniero de Montes.  
Servicio Provincial de Desarrollo Rural y Sostenibilidad de Zaragoza.  
GOBIERNO DE ARAGÓN

Plasencia (Cáceres), 29 de junio de 2017



# 1. INTRODUCCIÓN



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

## 1.1. Concepto de fuerza o tensión límite en un tramo de un curso torrencial

- Para proyectar la corrección de un curso torrencial, el estudio de cada tramo del cauce ha de calcular las magnitudes hidráulicas fundamentales, entre ellas **la fuerza o la tensión límite de arrastre** (o bien, de su magnitud correlativa, la velocidad límite del flujo): aquélla 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 torrencial**: cuando la corriente presente valores de fuerza de arrastre o de superiores a los límites, se producirá erosión y transporte; si son inferiores, se producirá depósito de materiales.

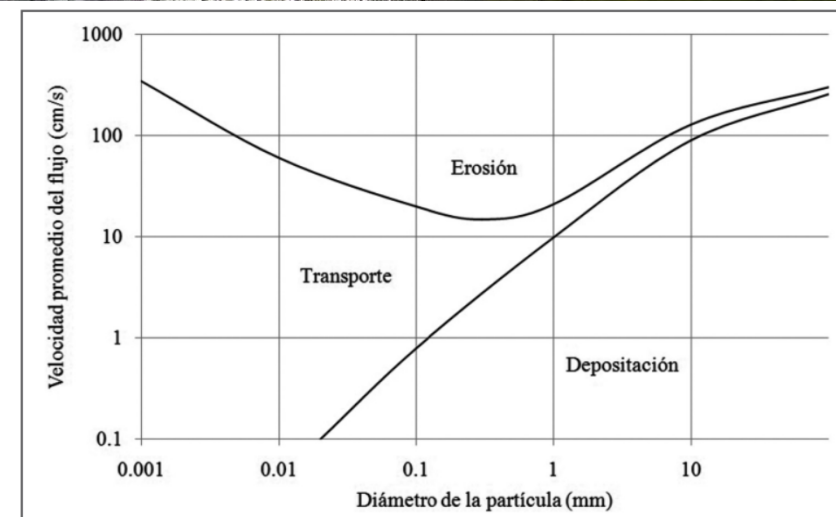


Diagrama de HJULSTROM (1935)

## 1.2. ¿Podemos calcular la fuerza límite sólo con manuales?

- **Tenemos manuales:** desde DU BOYS (1879, usando la tensión de arrastre sobre el lecho); SCHOKLITSCH (1934, el caudal); EINSTEIN (1950, una función estocástica); BAGNOLD (1980, potencia hidráulica)...

- **¿Nos valen?:** BETTESS (2002) y LAUCLAN y MAY (2002) han revisado las metodologías de uso más extendido, **concluyendo que todas incluyen parámetros de estimación subjetiva y además no tienen en cuenta muchos aspectos de la dinámica fluvial**, de modo que sus predicciones no resultan fiables, y menos en cursos torrenciales, y aún menos en los efímeros (= mediterráneos).

- Pero seguimos usando esas fórmulas... ¿Por qué? **Porque aparentemente, no tenemos nada mejor:** ¿cómo medir real y continuamente el transporte de fondo con un amplio rango de condiciones hidráulicas y sedimentológicas? Y aún más en los cursos torrenciales, y sobre todo en los efímeros: lo que de ellos se conoce procede casi solamente de excepciones.



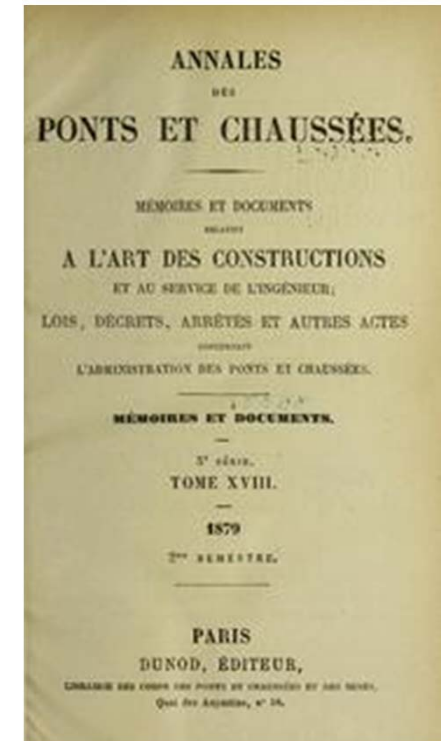
### Predicting Sediment Transport Dynamics in Ephemeral Channels: A Review of Literature

by Stephen H. Scott

The hydrology and sediment transport of arid-region ephemeral channels cannot be reliably predicted by extrapolation of humid region hydrology (McMahon 1979). Spatial and temporal variability in hydrologic processes and the resulting erosion and sedimentation processes are char-



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL



ERDC/CHL CHETN-VII-8  
September 2006

### 1.3. La naturaleza (y nuestros antecesores) nos hablan: las posibilidades de los cálculos por comparación con diques reales



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

- Pero en realidad sí tenemos miles de medidores reales de cauces torrenciales: las hidrotecnias (especialmente diques transversales) construidas por la Administración Forestal desde 1901, algunas de las cuales llevan más de un siglo funcionando de manera continuada en situaciones reales de torrencialidad.

- 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. Cada vez más autores están explorando esa vía: ROMERO (2008); HERNÁNDEZ et al. (2004); MARTÍNEZ DE AZAGRA et al. (2002) y RAMOS et al. (2013)...





*Benito Ayerbe Aísa (1872-1917)  
Ingeniero de Montes  
de la Sexta División Hidrológico-Forestal*

*“En estos torrentes no hay proyecto posible de corrección a priori; hay que corregirlos como ellos indiquen; hay que estudiarlos constantemente.”*



*Pedro Ayerbe Allué (1861-1935)  
Ingeniero de Montes  
Jefe de la Sexta División*

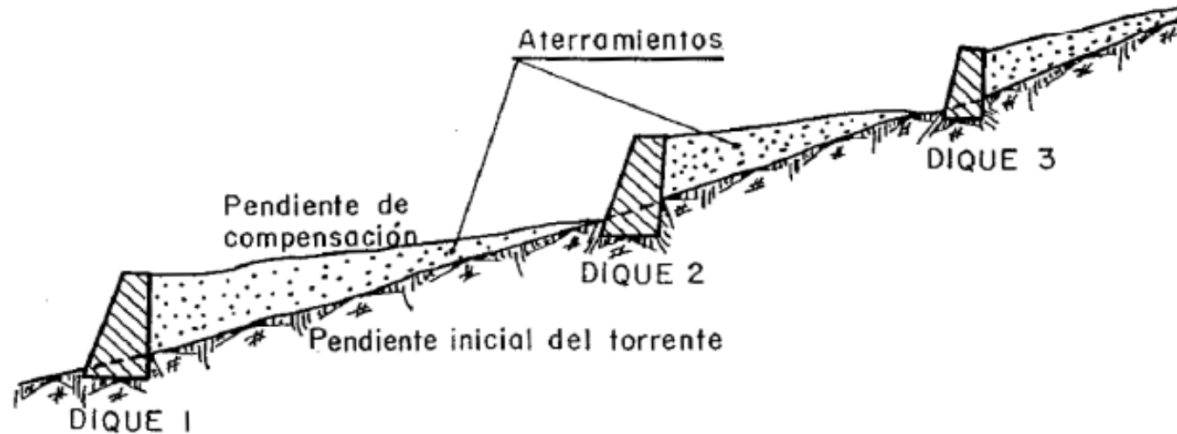
*“Siempre fue nuestra práctica el estar atentos a las indicaciones resultantes de la constante observación de la mayor o menor bondad de los trabajos que se ejecutan, a fin de introducir en ellos las convenientes modificaciones.”*



## 2. OBJETIVO



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL



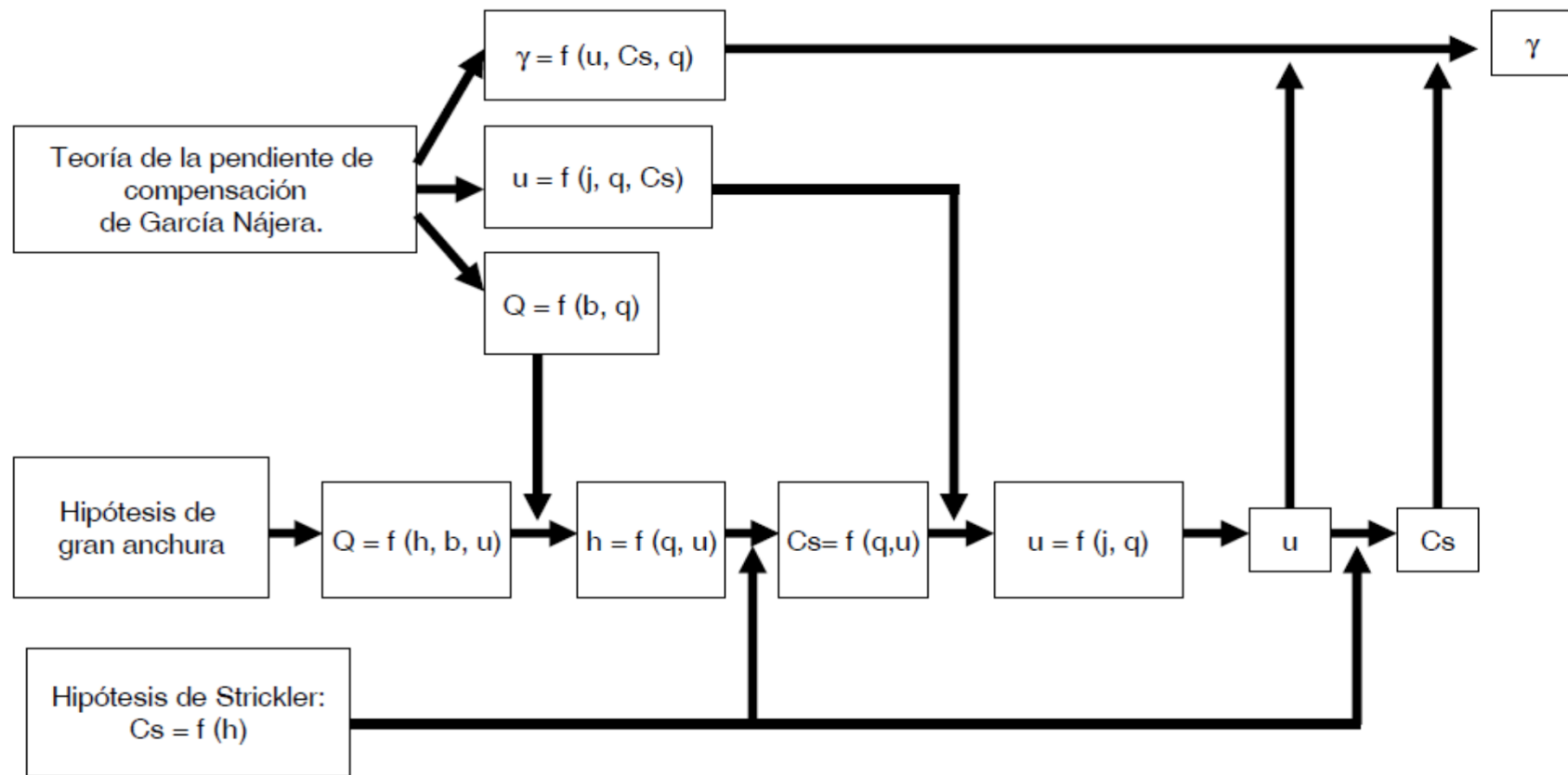
En esa línea, propusimos en su día (PÉREZ-SOBA, 2002) una metodología para el cálculo de la pendiente de compensación por comparación a partir de datos de pendientes alcanzadas en la realidad en diques ya colmatados.

Pretendemos ahora hallar un **método similar para el cálculo de la fuerza límite de arrastre**, que:

-1) 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 desde el punto de vista hidráulico.

2) Sea **sencillo de aplicar y práctico en cuanto a los datos necesarios**.

### 3. METODOLOGÍA



Hipótesis básicas: 1) En la pendiente de equilibrio se dan las circunstancias de GARCÍA NÁJERA (1962), y la relación de STRICKLER (1923) entre R y la C de Manning ( $C = n \cdot h^{1/6}$ ). Se acepta  $n=30$  en cauces rugosos. 2) Nos hallamos en un cauce de gran anchura ( $h=R$ ).

Simplemente se aplica a la inversa la teoría de García Nájera: en lugar de calcular la tensión límite mediante la fórmula de Schoklistch, según los materiales del lecho, partimos como dato de la pendiente y calcularemos la tensión límite que la ha producido.

## 4. RESULTADOS



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

$$\begin{array}{l}
 u^7 + qu^4 - 3\xi^2 q = 0 \\
 \xi = C_s^2 \gamma
 \end{array}
 \Rightarrow
 u^7 + qu^4 - 3 \cdot C_s^4 \gamma^2 q = 0 \Rightarrow \gamma = \left( \frac{u}{C_s} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{u^3 + q}{3q}}$$

La tensión límite queda 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). Procedemos al cálculo de la velocidad:

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

Para poder resolver la expresión, es preciso que  $C_s$  no esté en función del calado, sino de la velocidad, de modo que tengamos una sola incógnita en la ecuación. Para ello:

García Nájera:  $Q = 2qb/g$   
 Hipótesis de cauce ancho:  $Q = b \cdot h \cdot u$

$$\left. \begin{array}{l}
 Q = 2qb/g \\
 Q = b \cdot h \cdot u
 \end{array} \right\} \Rightarrow Q = b \cdot h \cdot u \Rightarrow h = \frac{Q}{bu} = \frac{\left( \frac{2qb}{g} \right)}{bu} = \frac{2q}{gu}$$

Introduciendo ese valor del calado en la fórmula de Strickler para el coeficiente de Manning,  $C_s$  queda en función de  $u$ , como queremos:

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





$$u = \left( \frac{2 \cdot j \cdot q}{g} \right)^{1/3} \cdot C_s^{2/3}$$
$$C_s = \alpha \cdot n \cdot \left( \frac{2q}{g \cdot u} \right)^{1/6}$$
$$u = \frac{2^{1/3} \cdot j^{1/3} \cdot q^{1/3}}{g^{1/3}} \cdot \frac{\alpha^{2/3} \cdot n^{2/3} \cdot 2^{1/9} \cdot q^{1/9}}{g^{1/9} \cdot u^{1/9}}$$

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

$$u = 0,5294 \cdot n^{0,6} \cdot j^{0,3} \cdot \alpha^{0,6}$$

$C_s \rightarrow \gamma$

Para  $n = 30$ :

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

# 5. DISCUSIÓN



## Ventajas con respecto a las fórmulas clásicas:

- 1) Esta metodología **es independiente de la granulometría** del lecho, ya que parte de un valor real de pendiente de compensación ya alcanzada, y por tanto evita usar las características de los materiales sólidos, no fáciles de obtener.
- 2) La mayoría de las fórmulas se han desarrollado a partir de experimentos de laboratorio, con unas relaciones concretas entre las variables hidráulicas, las condiciones del lecho y las tasas de transporte de material, y bajo condiciones de flujo uniformes. Las fórmulas que sí se basan en mediciones reales se refieren a cursos de agua de tipo fluvial. Este método **parte de datos medidos tras la actuación real durante años de los caudales.**

## Limitaciones 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, salvo la mínima corrección de usar el coeficiente de Manning en lugar del de Bazin. Esta teoría presenta ligeras imprecisiones y algunos aspectos mejorables (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1993) pero cuenta con unas sólidas bases físico-matemáticas, huye del empirismo, y es sencilla y práctica.
- 2) La hipótesis de cauces anchos no resulta aplicable a todos los cursos torrenciales ni a todos los tramos de estos cursos.

## 6. CONCLUSIONES



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

- El estudio del funcionamiento de las hidrotecnias de corrección 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.
  
- En particular, el desarrollo de metodologías que se basen en datos realmente obtenidos en dichas 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 dificultades que hay para la medición del fenómeno torrencial.
  
- Este método:
  - 1) Permite el cálculo aproximado de la fuerza límite a partir del dato de la pendiente de compensación realmente alcanzada en un dique ya aterrado que esté situado en un cauce que tenga condiciones análogas al que interese.
  - 2) Presenta la ventaja de ser independiente de las características de los materiales del lecho.
  - 3) Su validez 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.

# MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN... Y SU PACIENCIA



**GOBIERNO  
DE ARAGON**

Departamento de Desarrollo Rural  
y Sostenibilidad

Contacto  
Gobierno de Aragón  
Servicio Provincial de Desarrollo Rural y Sostenibilidad de Zaragoza  
Edificio Pignatelli. Paseo de María Agustín, 36. 50071 ZARAGOZA  
Correo electrónico: [iperezs@aragon.es](mailto:iperezs@aragon.es)



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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



26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura



[www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)