



## INFLUENCIA DE LA RELACIÓN ANCHO/TIRANTE EN LAS FÓRMULAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FLUVIALES

Américo Dini<sup>1</sup> y Alfonso Pujol<sup>2</sup>

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería  
e-mails: 1 – eschid@fi.uba.ar ; 2 – apujol@fi.uba.ar

### RESUMEN

La mayoría de las fórmulas de transporte de sedimentos fluviales han sido desarrolladas en base a datos de ríos medianos a pequeños. Ello es así porque ese tamaño de ríos facilita la obtención de una buena cantidad de datos hidrográficos, en particular de gastos líquidos (caudal) y sólidos. Sin embargo, las fórmulas desarrolladas a partir de esos datos tienen el inconveniente – entre otros – de estar fuertemente influenciados por las márgenes.

Grandes ríos, como el Paraná o el Amazonas, tienen una gran relación ancho/tirante ( $B/h$ ). En estos ríos se consiguen buenos resultados con la aplicación de fórmulas de transporte, en particular la de Engelund-Hansen (1967), basadas en datos de canales de laboratorio con relaciones  $B/h$  mayores de 5. Se mejoran aun más los resultados si se consideran subsecciones de la sección transversal, cada una con suficiente  $B/h$ , con tirante y velocidad relativamente constantes.

En esta contribución se presenta una fórmula que tiene en cuenta la influencia de las márgenes cuando la relación  $B/h$  es menor que 5 (Ec. 2). Para ello, se ha recurrido a datos de G. P. Williams (1970), los cuales son prácticamente coincidentes con los Guy et en el rango utilizado por Engelund-Hansen.

### ABSTRACT

Most of the sediment transport formulas for fluvial sediments have been developed using data from medium to small rivers. It is so because those river sizes make it easier to obtain a large amount of hydrographic data, mainly of liquid and sediment discharges. However, those formulas, developed from that kind of data, have the drawback – among other problems – of being strongly influenced the river banks.

Large rivers, like the Paraná River or the Amazone, have a large ratio width/depth ( $B/h$ ). For these rivers, good estimates may be obtained by the application of transport formulas, like the Engelund-Hansen (1967), based on data from laboratory flumes, when the ratio  $B/h$  is greater than 5. Result may be still improved if sub-sections of the cross-section are considered, each one with enough large  $B/h$ , and depths and velocities approximately constant.

In the present contribution, a sediment transport formula is put forward that takes into consideration whether the ratio  $B/h$  is larger or smaller than 5 (Eqs. 1 and 2). For that purpose, data from G. P. Williams (1970) has been used, that is practically coincident with the Guy et al data in the range used by Engelund-Hansen.

## Introducción

Es interesante mencionar que Williams, unos pocos años después de Guy et al (1966), realizó una extensa serie de ensayos de laboratorio que básicamente corroboran los de Guy et al, usados por Engelund-Hansen. A nuestro entender, los ensayos de Williams no han sido aprovechados hasta ahora para desarrollar una fórmula, menos aun para considerar la influencia de  $B/h$ . En la Fig. 1 se incluye una versión modificada por A. Pujol (2006) de la fórmula de Engelund-Hansen y la propiciada en la presente contribución – prácticamente coincidentes cuando no con influye  $B/h$ , como es el caso ilustrado en ese gráfico. La modificación de A. Pujol cambia el valor de  $\alpha = 0,1$  (original) por  $\alpha = 0,04$ , variación producida al eliminar los valores de *Guy et al* condicionados por las paredes del canal de ensayos. En efecto, la condición de cauce aluvial con libertad de ajustar ancho, profundidad y pendiente, reduce el número de casos que la cumplen. Así, no la cumplen *todos* los datos de Guy et al (1966) usados por Engelund para calibrar su fórmula. Se reduce notablemente el número de casos si se recuerda el criterio sugerido por H. H. Chang (1985) de que solo la cumplen los casos que excluyen la influencia de márgenes rígidas (el vidrio del canal) y, en el otro extremo, la aparición de barras alternadas como comienzo de la aparición de meandros (Pujol, 2008).

Debe señalarse que ha sido posible graficar la curva para Engelund-Hansen *modificada*, adoptando un valor  $c^2 = 114$ ; otros valores hasta  $c^2 \pm \sigma$  (desvío estándar) resultan en una “franja” en torno a la curva de Engelund-Hansen *modificada*, según se muestra en la Fig. 2. El adoptar  $c^2 = 114$  respondió al interés de los autores (2010) de incluirla en un gráfico que solo tiene como variables a  $\phi v$  y  $\tau_{adim}$ , de la Fig. 2.33 del Sedimentation Engineering, ASCE Manual # 110

Además de esa inclusión, los autores también seleccionaron la mitad de los datos usados para desarrollar la fórmula de Engelund-Hansen, que tuviesen las mayores relaciones  $B/h$ , supuestamente tendiendo a la bidimensionalidad y que se representó con la expresión  $\phi_{vol} = 2 \tau_{adim}^{2,8}$ . Esa segunda curva “casi-bidimensional” aparece en la Fig. 1 bastante por debajo de las curvas de Engelund-Hansen *modificada*.

## Desarrollo

Como se advierte de lo arriba comentado, con los datos de Williams puede obtenerse una expresión muy cercana a la de Engelund-Hansen *modificada*, según se muestra en la Fig. 1:

$$\phi v = 7.24. \tau_{adim}^{2.6} \quad [1]$$

La exitosa aplicación de las fórmulas de Engelund-Hansen o la Ec. 1 (E-H *modificada*), en grandes ríos indicaría que la transición entre dos subsección sucesivas – cada una con velocidades y concentraciones aproximadamente constantes – constituye una perturbación con un significado relativamente moderado en el comportamiento de las subsecciones, claro está, salvo en escalones y planos longitudinales, y, evidentemente, las márgenes.

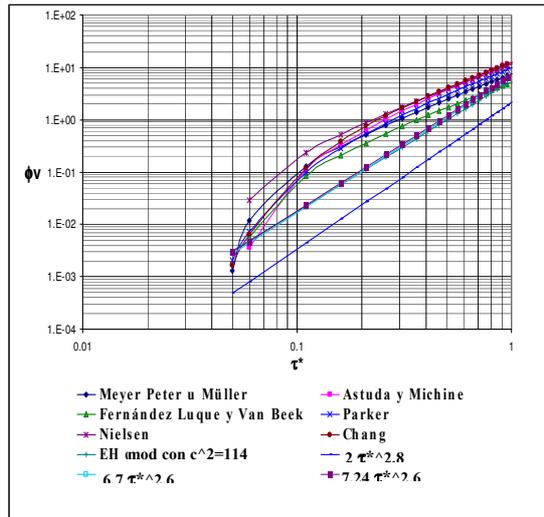


Figura 1. - Fórmulas de transporte de sedimentos en función de  $\phi_{Vol}$  y  $\tau_{adm}$  cuando  $B/h$  no influye.

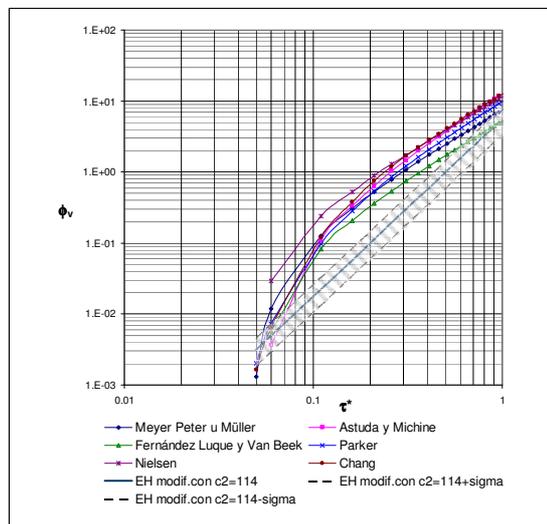


Figura 2.- Engelund-Hansen *modificada*, para  $c^2 = 114$ , con inclusión de la franja de  $c^2 \pm 47$  (desvío estándar)

La Ec. 1 es válida para  $B/y \geq 5$ . Adicionalmente es posible incluir la influencia de  $B/h$ , en una expresión para  $B/h < 5$ :

$$\phi_v = 2 (\tau_{adm})^{2,6} (B/h)^{(1,5 - 0,14 B/h)} \quad [2]$$

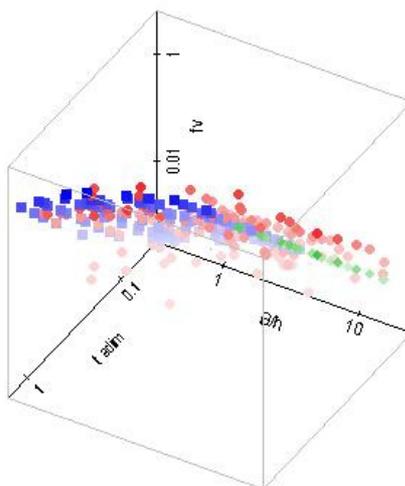
Debe advertirse que la Ec. 2 es idéntica a la Ec. 1 cuando  $B/h = 5$ . Para  $B/h > 5$  solo es válida la Ec. 1 y para  $B/h < 5$  solo es válida la Ec. 2.

En la Fig. 2 se ha incluido una franja en torno a la curva de la fórmula de Engelund-Hansen *modificada*, para  $c^2 = 114$ , que corresponde a  $\pm$  el desvío estándar en torno a esa curva, o sea con  $c^2 = 114 \pm 47$ . Asimismo, en la Tabla 1 se asienta valores de  $\tau_*$  y  $c^2$ , aplicables tanto a la fórmula de Engelund-Hansen *modificada*, como a la original.

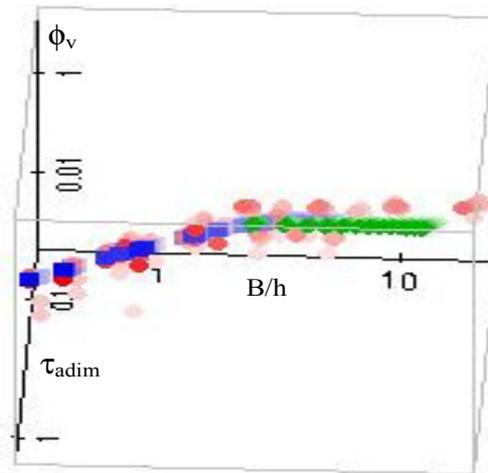
**Tabla 1** – Aplicación de Engelund-Hansen *modificada*

Aplicación de la fórmula de Engelund-Hansen <i>modificada</i> al río Paraná en Aguas Corrientes (Ciudad de Paraná)				
Caudal $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Veloc. $V$ [m/s]	Tirante medio, $h$ [m]	Tensión de corte adim. $\tau^*$	$c^2$
6.000	0,666	8,17	0,820	113
10.000	0,890	9,86	0,989	167
12.959	1,049	10,69	1,075	214
20.750	1,414	12,45	1,250	334
se han tomado valores medio en la sección de aforos				

En la Fig. 3. se muestran los puntos experimentales de Williams, el ajuste con una superficie curva tridimensional para  $B/h < 5$  representado por la Ec. 2 y el ajuste con un plano para  $B/h > 5$ , representado por la Ec. 1.



**Figura 3.-** Superficie  $\phi_v = f(\tau_{adm}; B/h)$ . Datos de Williams – Datos • – Ec [1] ◆ – Ec.[2] ■



**Figura 4.** Influencia de  $B/h$  sobre  $\phi_v$  y  $\tau_{adim}$ ;  
Williams – Datos ● Ec [1] ◆ Ec [2] ■

Por otra parte, la rotación del espacio  $[\phi_v; \tau_{adim}; B/h]$  en la Fig. 4, pone en evidencia la transición entre la Ec 2 y la Ec. 1. En realidad solo se trata de un giro de los ejes  $[\phi_v; \tau_{adim}; B/h]$ , a ese efecto.

### Futuras investigaciones de laboratorio

Dentro del presente esquema, queda por investigar la influencia de márgenes de distintas rugosidades y pendientes. Para ello, podría resultar necesario ejecutar una serie adicional de ensayos de laboratorio.

Sin embargo, no son muchas las alternativas posibles: los resultados que se muestran en las Figs. 2 y 3 indicarían que se mantiene válido el supuesto de Bazin de que una pared vertical proyecta su influencia hacia el flujo central en  $2,5 h$  ( $5/2$  el tirante). Así como en un lecho de dunas, se considera el “fondo virtual” a nivel de la semialtura de las dunas, también las márgenes verticales con importante rugosidad, podría considerarse una “margen virtual” a partir de un punto medio de las protuberancias que exhiba.

Como ya se ha mencionado, es necesario ratificar experimentalmente si los datos de la bibliografía mayormente dedicados a contornos lisos, son aplicables directamente a las márgenes – verticales, inclinadas, o curvas –, los cambios escalonados del fondo o los planos inclinados longitudinales, etc.

La curva inferior de la Fig.1, con expresión  $\phi_{vol} = 2\tau_{adim}^{2,8}$ , podría aplicarse en situaciones en que una subsección de una sección de aforos es tan ancha ( $\Delta(B_j/h_j)$  muy grande) que sería posible intercalar un tramo “casi bidimensional”.

En la práctica se acepta el supuesto de que son aplicables las transiciones estudiadas para contornos lisos, sin una mayor verificación, pero ello no implica su aceptación, lisa y llana.

### Relevamientos de campaña

Respecto a la relación gasto sólido/gasto líquido, se supondría relativamente biunívoca para determinadas condiciones hidrográficas. Sin embargo, en recientes mediciones de Szupiany-

Latosinski (mayo 2011) en el brazo Colastiné del río Paraná, se advierte que en numerosos casos aparecen trayectorias dispares entre el transporte sólido respecto del líquido, aun cuando – de acuerdo a experiencia – la aplicación de la fórmula de Engelund-Hansen todavía ofrezca relativamente buenos resultados. Una especulación, previa a lo que publiquen esos investigadores, y de acuerdo al sentido común, indicaría que el sedimento que transporta el río Colastiné debería estar vinculado a una determinada condición hidrométrica, ya que ese río, como brazo del Paraná, esta condicionado a un cierto transporte líquido-sólido, salvo que se esté profundizando o atarquinando.

## Conclusiones

Esta contribución informa sobre el avance de una investigación que, en una fórmula de transporte de sedimentos, incluye adicionalmente la tridimensionalidad de los cauces con una baja relación *ancho/tirante* ( $B/h$ ). Con esa intensión y utilizando las bases de datos de Guy et al y de Williams, se ha intentado:

- desarrollar una *modificación* de la fórmula de Engelund-Hansen, para lo cual se han eliminado aquellos datos influidos por las paredes del canal de ensayos de Guy et al; corresponde a la Ec. 1.
- verificar la Ec. 1 con los datos de Williams, encontrando que concuerda adecuadamente, para  $B/h > 5$ .
- desarrollar una extensión de la fórmula de Engelund-Hansen *modificada*, para el caso en que  $B/h < 5$ , expresada mediante la Ec. 2.
- a pesar de la opinión por lo contrario de Williams – él opina que esa influencia llega a  $B/h = 7$  – esa distinción entre casos mayores y menores que  $B/h = 5$ , indicaría que la influencia de las paredes (de los canales de ensayo) se extienden a  $2,5 h$ , según se acepta en la literatura técnica. Por otra parte, Williams consideraba que las formas de fondo prácticamente eliminan la influencia de las paredes de vidrio de los canales de ensayo.
- Es habitual considerar el lecho de un cauce como ubicado en concordancia con la semi-altura de las forma de fondo. Esa convención permite dar un adecuado inicio al perfil de velocidades. Podría suponerse que corresponde un igual tratamiento para las márgenes de un cauce, siempre que las perturbaciones no signifiquen alteraciones del flujo medio.

Los resultados presentado en esta contribución son fruto de la elaboración de datos ajenos, principalmente los de Guy et al y los de Williams. De todos modos, la falta de una infraestructura experimental y de campaña en la Facultad de Ingeniería de la UBA, sugiere que se deberá recurrir en otras instituciones para completar las investigaciones de laboratorio y de campaña que se proponen.

## Lista de Símbolos

$$\phi_{Vol} = \frac{g_{s\ total}}{d_s^{3/2} \sqrt{g(s-1)}} \quad \text{función de transporte adimensional}$$

$$\tau_{adm} = \frac{R I}{(s-1)d_s} \quad \text{tensión de corte adimensional}$$

$g_{s\ total}$  gasto volumétrico total de sedimento por unidad de ancho, en  $m^3/s/m$

$d_s$  diámetro significativo del sedimento, en m

$g$  aceleración de la gravedad

$s$	razón entre las densidades del sedimento y del agua
$R$	radio hidráulica, en m
$I$	pendiente hidráulica del cauce
$B$	ancho de la sección transversal o de una subsección
$h$	tirante de la sección transversal o de una subsección

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **ASCE** (2007): *Sedimentation Engineering – Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. Ed. M. García, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. Reston, Virginia, USA. Fig. 2-33, pag.74.
- **Chang, H. H.** (1985): “*Formation of Alternate Bars*”. J. of Hydr. Engrg. ASCE, Vol. 111, pp. 1412-20. Octubre.
- **Dini, A. L. y A. Pujol** (2010): “Compatibilización de fórmulas de transporte de sedimentos no-cohesivos”. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica – IAHR, Punta del Este, Uruguay. Noviembre.
- **Engelund, F. y E. Hansen** (1967): *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Dinamarca.
- **Guy, H. P., D. B. Simons y E. V. Richardson** (1966): *Summary of Alluvial Channel Data from Flume Experiments*. Professional Paper 462-I. U. S. Geological Survey.
- **Pujol, A.** (2008): “Propuestas para mejorar la precisión de los aforos de transporte de sedimentos granulares”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica – IAHR. Cartagena de Indias, Colombia. Setiembre.
- **Pujol, A.** (2006): “Mejores predicciones de transporte de sedimento con mediciones a lo largo de tubos de corriente”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica – IAHR. Ciudad Guayana, Venezuela. Octubre
- **Szupiani, R. N. y F. Latosinski** (2011): comunicación personal, Santa Fe, Argentina, mayo,
- **Williams G. P.** (1970): “Flume width and water depth effects in sediment transport experiments”. Professional Paper 562h, U.S. Geological Survey.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



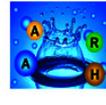
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

