

Determinación de Esfuerzos de Corte Crítico para Transporte de Partículas en Ríos de Alta Pendiente con sustrato Bimodal

*F. Muñoz Cariqueo*¹, *D. Caamaño A*², *Angel Monsalve S.*³

RESUMEN

Para este estudio se plantea la hipótesis que la pendiente longitudinal del lecho, así como la distribución bimodal del sustrato, afectan la magnitud de los esfuerzos de corte críticos asociados a partículas dispuestas sobre diferentes configuraciones granulométricas en un lecho de grava. Se agrega un grado de libertad a los estudios realizados por Lamb et al., (2008) combinando los cambios de pendiente con diferentes distribuciones de sedimentos. Se utilizan 9 configuraciones de sustrato, 3 homogéneas y 6 bimodales, y se varía la pendiente del fondo entre 8 y 14%. Se registra el inicio del movimiento, y las variables hidráulicas asociadas (i.e. profundidad de agua y caudales). Se estiman los esfuerzos de corte crítico y se normalizan según lo indicado por el criterio de Shields. Los resultados obtenidos para el lecho homogéneo concuerdan con lo descrito por Lamb et al., (2008) presentando un aumento del esfuerzo de corte crítico con la pendiente. El sustrato bimodal entrega resultados de esfuerzo de corte que no pueden relacionarse directamente a todos los tamaños de sedimento estudiados, sugiriendo la presencia de otros procesos de transporte y un límite inferior definido por $D_{50i}/D_{50j}=0.4$ luego del cual el esfuerzo de corte crítico queda definido por el rompimiento del sustrato de fondo.

PALABRAS CLAVES

Ríos de alta pendiente, transporte de sedimentos, función de escondimiento, esfuerzos de corte crítico.

ABSTRACT

For this study, it is hypothesized that the longitudinal slope of the bed, as well as the bimodal distribution of the substrate, are both affecting the magnitude of critical shear stresses associated with different particles grain size configurations in a gravel bed flume. A degree of freedom is added to the studies carried out by Lamb et al., (2008) combining the slope changes with different sediment distributions. Nine substrate configurations are used, 3 homogeneous and 6 bimodal, and the flume longitudinal slope varies between 8 and 14%. The hydraulic incipient motion condition is identified and the associated hydraulic variables (i.e. depth of water and flows) recorded. Critical shear stresses are estimated and normalized as indicated by the Shields criterion. The results obtained for the homogeneous bed agree with those described by Lamb et al., (2008), showing an incremental critical shear stress with slope. The bimodal substrate provides shear stress results that cannot be directly related to all the studied sediment sizes, suggesting the presence of other transport processes and a lower limit defined by $D_{50i}/D_{50j}=0.4$ after which the shear stress is defined by the breaking of the substrate.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fmunozc@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamaño@ucsc.cl

³ Researcher, Center for ecohydraulics Research, University of Idaho, USA, angelm@idaho.edu

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en el transporte de sedimento en ríos de altas pendientes, puesto se conoce que su comportamiento es diferente a los ríos aluviales de baja pendiente ubicados en los valles (Lenzi et al., 1999; Comiti & Mao, 2012). Por lo tanto, modelos predictivos para la iniciación de movimiento en ríos de baja pendiente no serían válidos para flujos generados en pendientes altas. Consecuentemente se precisa mejorar el conocimiento de los procesos físicos del transporte de sedimento en estos últimos sistemas fluviales.

El sedimento en ríos de alta pendiente presenta una granulometría variada. Las partículas más grandes están más expuestas al flujo y, por tanto, sobre ellas actuarán fuerzas mayores que sobre las partículas de menor tamaño, las cuales se esconden o están al abrigo de las partículas grandes o medias (Aguirre-Pe, et al., 2002).

Los granos grandes pueden resistir una porción significativa del esfuerzo cortante total y, por lo tanto, reducen el esfuerzo disponible para mover el sedimento más fino. Las ecuaciones de transporte de sedimento de fondo convencionales a menudo sobreestiman el flujo de sedimentos en canales empinados en varios órdenes de magnitud, porque no tienen en cuenta la tensión que soportan los granos que rara vez se mueven, no diferencian entre sedimentos muy y poco móviles, y no tienen en cuenta la disponibilidad limitada del sedimento que viene desde aguas arriba (Yager et al., 2007).

El material más fino se transporta selectivamente en canales empinados (Lenzi et al., 1999) con esfuerzos cortantes críticos adimensionales altos y de hasta 0,1 (Bathurst et al., 1987), en comparación con magnitudes menores entre 0,035 y 0,06 según lo establecido por (Montgomery & Buffington, 1997) para canales de gradiente menor. Consecuentemente, en lechos con pendientes empinadas, el esfuerzo cortante crítico puede depender de la pendiente del canal y el grado de escondimiento de las partículas, (Bathurst et al., 1987).

Es importante definir cauces de tipo natural versus artificial, principalmente debido a su origen. Los primeros han sido creados por los ecosistemas para drenar el agua en forma de arroyos o ríos, transportando también sedimentos según su disponibilidad y condiciones de flujo. Por su parte los canales artificiales tienden a ser de forma geométrica claramente definidas y en diversas secciones se tienen dimensiones constantes. En este estudio se utilizó un canal de laboratorio de carácter artificial para simular escenarios de alta pendiente y con ello cuantificar flujos y esfuerzos de corte necesarios para mover la porción móvil del sustrato de fondo. Se utilizará la tensión crítica de Shields para normalizar el movimiento inicial de los sedimentos y buscar una relación con la pendiente y el grado de escondimiento.

Así se define la dependencia del esfuerzo de corte crítico con la granulometría se suele establecer por medio del uso de las funciones de escondimiento definidas para una pendiente alta constante.

$$\frac{\tau_{ci}^*}{\tau_{c50}^*} = \left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)^{-\gamma} \quad (1)$$

Donde τ_{ci}^* se define como el esfuerzo de corte crítico adimensional necesario para el inicio del movimiento de tamaño i -ésimo de la muestra. τ_{c50}^* es el esfuerzo de corte crítico definido para partículas de diámetro D_{50} y finalmente γ indica el grado de dependencia del transporte para la razón $\frac{D_i}{D_{50}}$. Esta ecuación estima el esfuerzo de corte necesario para iniciar el movimiento de granos de cualquier tamaño para una granulometría conocida independiente de la pendiente del lecho. En este estudio buscamos identificar como la pendiente del lecho afecta las magnitudes de los esfuerzos de corte definidos por la ecuación (1).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Cuantificar la relación de la pendiente del lecho para el movimiento incipiente de partículas en ríos de alta pendiente con lechos compuestos por un substrato bimodal.

2.2 Objetivo Especifico

- Diseñar ensayos de laboratorio para pendientes sobre el 8% .
- Cuantificar las variables hidráulicas necesarias para estimar el esfuerzo de corte para cada uno de los escenarios experimentales definidos.
- Agrupar los resultados en un modelo conceptual o expresión matemática.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Modelo experimental

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. En particular, en el canal de pendiente variable que dispone de una sección rectangular de 0.32m de ancho y alcanza una longitud de 5 metros de largo. La pendiente longitudinal del lecho del canal puede variar entre 0 y 14%. El canal cuenta con un fondo de acero inoxidable y cubiertas laterales de vidrio templado de muy poca rugosidad. El flujo se genera a través de una bomba hidráulica cuyo caudal es controlado electrónicamente por un regulador de frecuencia a través de un software especialmente diseñado para dichos fines. El caudal se cuantifica con un flujómetro electromagnético ubicado en la tubería de impulsión del sistema. Para los experimentos se consideró un rango de pendientes características de ríos de alta montaña cuyas inclinaciones se definieron en 8%, 10%, 12% y 14% respectivamente.

3.2 Sedimentos

Se trabajará con una muestra de sedimentos que según la caracterización dada en el laboratorio de mecánica de suelos de la UCSC es correspondiente a 126 kg de grava limpia con pocos o escasos finos, esto según la clasificación descrita por Unified Soil Classification System (USCS). Esta muestra corresponde a la misma que utilizó Farran et al., (2019) para estudiar pendientes de menor magnitud, y cuyos tamaños característicos se representan en la tabla 1.

Tabla 1: Diámetros nominales de las partículas en estudio

Etiqueta	Diámetro (mm)
D ₁	12,5
D ₂	9,5
D ₃	6,3
D ₄	4,75

Para los ensayos se define como material de fondo del lecho los 3 tamaños superiores (i.e. D_1 , D_2 , D_3), consecuentemente se consideran estos d_{50} de fondo para tres experimentos con tamaño homogéneo y 4 pendientes longitudinales del canal entre el 8 y 14%, donde D_{50} es el tamaño de partícula correspondiente al 50% que pasa y representa el tamaño medio del grano. Para definir el sustrato bimodal se utilizan 200 partículas móviles definidas por cada uno de los tres tamaños menores (i.e. D_1 , D_2 , D_3), las partículas móviles se ubican sobre los sustratos más gruesos dando origen a 6 escenarios de fondo nuevos para cada una de las pendientes estudiadas. Los escenarios descritos se indican en la tabla 2.

Tabla 2: Escenarios de estudios para lechos homogéneos y bimodales

S_0					
Fondo	Móvil	S_1 (m/m)	S_2 (m/m)	S_3 (m/m)	S_4 (m/m)
D1	D1*	8%	10%	12%	14%
	D2	8%	10%	12%	14%
	D3	8%	10%	12%	14%
	D4	8%	10%	12%	14%
D2	D2*	8%	10%	12%	14%
	D3	8%	10%	12%	14%
	D4	8%	10%	12%	14%
D3	D3*	8%	10%	12%	14%
	D4	8%	10%	12%	14%

*Denota los escenarios con lecho homogéneo.

En total se registrarán 36 escenarios, y cada uno de estos se realiza 5 veces con la finalidad de obtener una validez estadística de los resultados. Por lo tanto, se llevaron a cabo 180 ensayos de movimiento incipiente. La figura 1 muestra la composición de 3 de estos escenarios en la zona de estudio del canal.



Figura 1: Escenarios experimentales corresponden al lecho base D_1 con partículas móviles D_2 , D_3 y D_4 , respectivamente.

3.3 Diseño Experimental

Los ensayos replicaron el procedimiento definido por Farrán et al., (2019) y que se detalla a continuación:

- 1) Se fija la pendiente del fondo.
- 2) Se prepara la base del canal instalando las partículas del fondo para replicar un fondo de espesor equivalente a 3 veces el diámetro de base. Se genera la zona de interés cubriendo una longitud total de 1,5 m aguas arriba de la salida libre del canal despejando el área de muestreo definida a 0.59 m aguas arriba de la salida con una longitud de 0.38 m.
- 3) Se ubica el material del fondo en el área de muestreo y se deja fluir el agua por 5 minutos para replicar el natural acomodamiento de las partículas.
- 4) Una vez acomodadas las partículas se vierten en el área de muestreo 200 partículas móviles (Figura 2) y se repite el proceso hasta que se acomoden las partículas.
- 5) Una vez acomodadas las partículas móviles se procede al aumento lento y gradual del caudal hasta obtener una condición de transporte de las partículas móviles definida según el criterio propuesto en Papanicolaou et al., (2002) que corresponde a una probabilidad de inicio de movimiento igual al 2%.
- 6) Satisfecha la condición del inicio de movimiento del 2% se mantiene el caudal constante para realizar las mediciones de las variables hidráulicas. Se registra la elevación de la superficie del agua usando 5 regletas equiespaciadas a lo largo de la zona de interés, la pendiente longitudinal y el caudal respectivo. Con estas se puede determinar el esfuerzo de corte que causo el movimiento de las partículas y la velocidad promedio del flujo.

4. ECUACIONES

4.1 Ecuaciones de esfuerzo de corte critico

Para obtener la expresión que estime el esfuerzo de corte crítico para cada escenario estudiado, se verifica el flujo uniforme. Luego se utiliza la pendiente del fondo y la altura de escurrimiento registrada desde la superficie del sustrato y los resultados se normalizan según lo indicado por Shields (ecuación 2).

$$\tau_{ci}^* = \frac{\tau_{ci}}{\rho R g D_{50}} \quad (2)$$

Así τ_{ci}^* es el esfuerzo de corte critico adimensional, τ_{ci} es el esfuerzo de corte critico obtenido experimentalmente en N/m^2 que representa el inicio del movimiento de las partículas de tamaño i . Además, ρ corresponde a la densidad del agua, $R = 1,65$ y g es la aceleración de gravedad.

5. RESULTADOS

En el anexo 8.1 se detallan las profundidades de agua y caudales de todos los escenarios realizados en el laboratorio que se utilizan para calcular sus respectivos esfuerzos de corte crítico adimensional y respectivamente en el anexo 8.2 se detallan para todos los escenarios registrados sus respectivos esfuerzos de corte critico adimensional para la elaboración de todos los gráficos mostrados a continuación.

La tabla 3 indica los resultados registrados para la primera repetición de los escenarios definidos en la tabla 2.

Tabla 3: Caudales (m^3/s) registrados al momento de observar el movimiento incipiente de las partículas correspondiente a la primera repetición de los ensayos

Fondo	Móvil	8%	10%	12%	14%
D ₁	D ₁	0,00335	0,00450	0,00306	0,00399
	D ₂	0,00258	0,00320	0,00308	0,00243
	D ₃	0,00238	0,00597	0,00229	0,00165
	D ₄	0,00414	0,00454	0,00623	0,00315
D ₂	D ₂	0,00270	0,00327	0,00222	0,00193
	D ₃	0,00210	0,00286	0,00213	0,00181
	D ₄	0,00333	0,00293	0,00179	0,00172
D ₃	D ₃	0,00240	0,00200	0,00184	0,00179
	D ₄	0,00203	0,00183	0,00168	0,00163

La Tabla 4 indica los resultados calculados para el esfuerzo de corte crítico adimensional representados por su mediana.

Tabla 4: Esfuerzo de Corte Adimensional representados por la mediana de los resultados para el caso del sustrato homogéneo

	D ₁	D ₂	D ₃
8%	0,058503	0,089580	0,164298
10%	0,083523	0,119235	0,173606
12%	0,103055	0,157489	0,242973
14%	0,094344	0,162582	0,234169

La figura 2 resume todos los resultados obtenidos para el esfuerzo de corte adimensional. Las repeticiones se representan en grafico de cajas, en que las líneas rojas representan la mediana de los valores obtenidos.

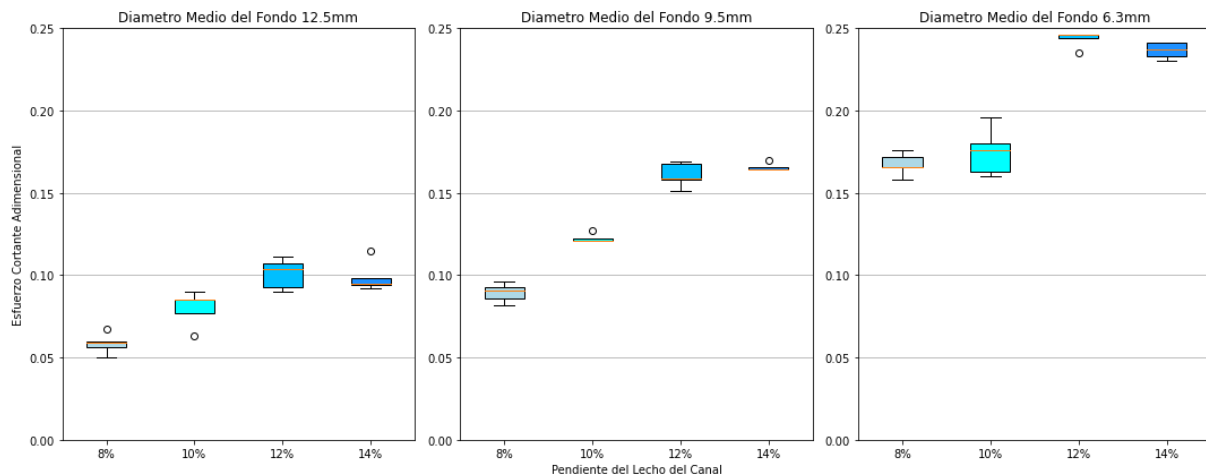


Figura 2: Esfuerzo cortante adimensional vs $D_i/D_{50} = 1$ con respecto a las pendientes de fondo.

En la figura 2 se indica un aumento de los esfuerzos de corte adimensional asociados al incremento de la pendiente para cada uno de los tamaños de sedimentos que componen el lecho tal cual lo describe Lamb et al., (2008). Es interesante observar que la tendencia se repite para los 3 tamaños, pero los valores de los esfuerzos de corte asociados aumentan inversamente con el tamaño del sustrato que compone el fondo.

La tabla 5 se muestra las medianas de los esfuerzos de corte adimensional para cada fondo estudiado.

Tabla 5: Valor de las medianas de los esfuerzos cortantes adimensional para cada fondo

Fondo D ₁				
	8%	10%	12%	14%
D ₁ /D ₁	0,05850	0,08352	0,10306	0,09434
D ₂ /D ₁	0,05541	0,08274	0,09929	0,07867
D ₃ /D ₁	0,05486	0,09526	0,09754	0,06951
D ₄ /D ₁	0,08528	0,09127	0,13825	0,09192
Fondo D ₂				
	8%	10%	12%	14%
D ₂ /D ₂	0,08958	0,11924	0,15759	0,16258
D ₃ /D ₂	0,09282	0,13561	0,16137	0,15773
D ₄ /D ₂	0,10355	0,13886	0,16043	0,11966
Fondo D ₃				
	8%	10%	12%	14%
D ₃ /D ₃	0,16430	0,17361	0,24297	0,23417
D ₄ /D ₃	0,14920	0,17866	0,20480	0,22765

Gráficamente se representa en forma de ejemplo el caso para el fondo D₁ en la figura 3:

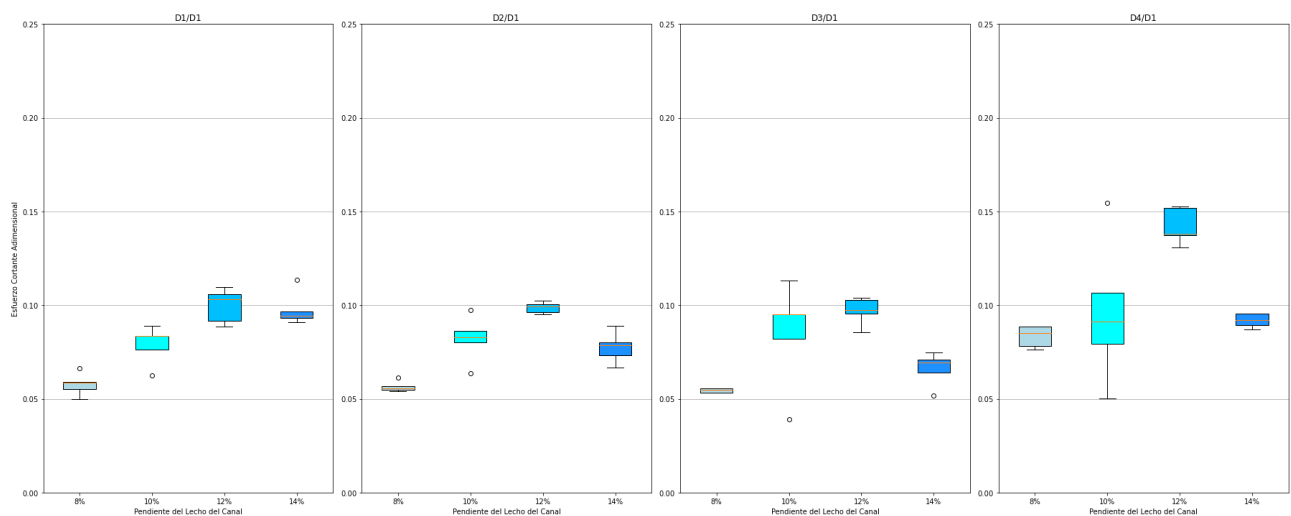


Figura 3: Esfuerzo de corte adimensional para fondo D₁ y partícula móvil D_i para las diferentes pendientes consideradas.

En la figura 3 se puede ver que existe un aumento de la tensión de corte adimensional en cuanto aumenta la pendiente del canal, notándose una ligera disminución en la pendiente del 14%. Estos resultados a excepción de la pendiente al 14% concuerdan con la suposición en que el esfuerzo de corte crítico aumenta de forma directa con respecto a la pendiente de fondo y la rugosidad relativa (Bathurst, 1978; Lamb et al., 2008).

Se puede observar que las partículas D_4 se mueven solo cuando se rompe el fondo, es decir, el esfuerzo de corte necesario para el transporte se asocia al sedimento del lecho. Además, este esfuerzo es mayor en magnitud que el esfuerzo de corte necesario para mover el lecho D_1 en su estado homogéneo, sugiriendo que las partículas de menor tamaño aumentan el nivel de imbricación del lecho incrementando el grado resistencia al movimiento.

En la tabla 6 se muestran los esfuerzos de corte adimensional ordenados de menor a mayor con respecto a la razón D_i/D_{50} .

Tabla 6: Esfuerzo de corte adimensional según la disminución del factor de escondimiento en sentido horizontal y aumento de la pendiente en vertical.

	D_4/D_1 0,39991	D_4/D_2 0,52091	D_3/D_1 0,55401	D_3/D_2 0,70647	D_4/D_3 0,76916	D_2/D_1 0,83236
8%	0,08528	0,10355	0,05486	0,09282	0,14920	0,05541
10%	0,09127	0,13886	0,09526	0,13561	0,17866	0,08274
12%	0,13825	0,16043	0,09754	0,16137	0,20480	0,09929
14%	0,09192	0,11966	0,06951	0,15773	0,22764	0,07867

Se observa en la tabla anterior que con el aumento de las pendientes del canal para cada escenario las medianas aumentan salvo en la pendiente del 14%. Gráficamente estos resultados se representan en la figura 4, con gráficos de caja que agrupan los 5 ensayos realizados en cada escenario, además se representa en el eje de las abscisas el valor de D_i/D_{50} disminuyendo de izquierda a derecha.

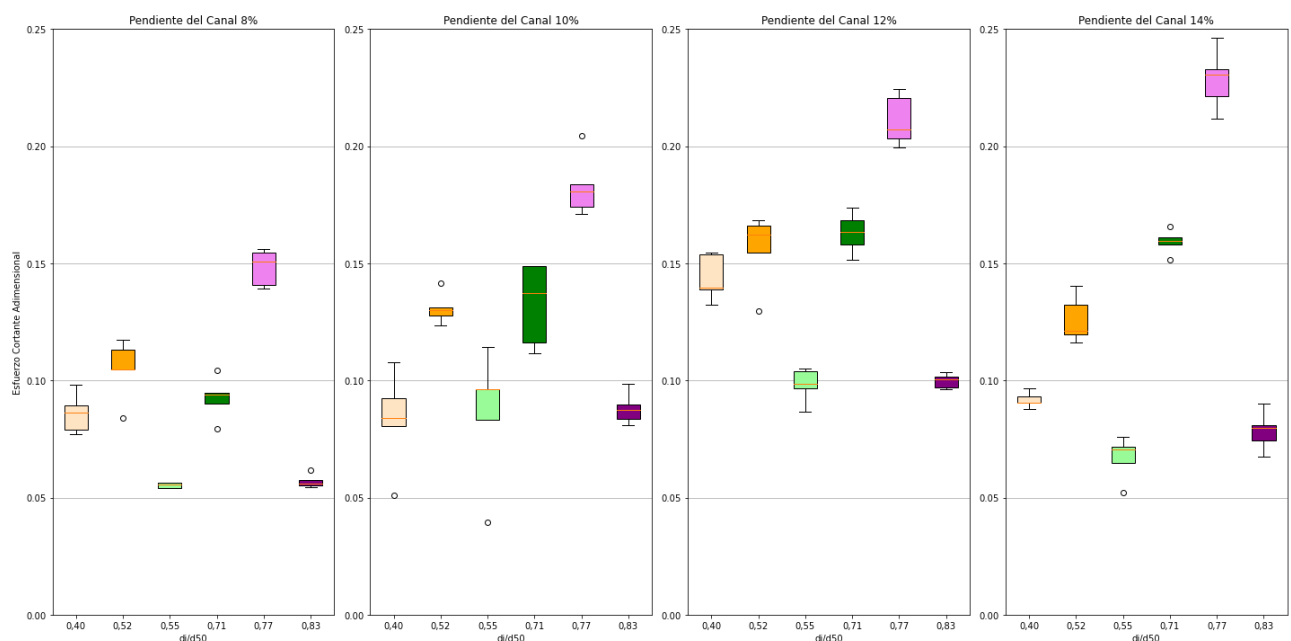


Figura 4: Esfuerzo de corte adimensional según el grado de escondimiento de las partículas.

La figura 4 presenta como al aumentar la pendiente del canal, el comportamiento del esfuerzo de corte para cada escenario trabajado aumenta, pero se aprecian 2 comportamientos inusuales en los gráficos como lo es D_3/D_1 y D_2/D_1 , que gráficamente se alejan de la tendencia creciente del resto de resultados. Esto sugiere que la razón de diámetros por sí sola no sería suficiente para estimar el esfuerzo de corte crítico para estos tamaños, aludiendo la presencia de otros procesos físicos involucrados en el trasporte.

Tabla 7: Esfuerzo de corte adimensional en los 3 fondos estudiados para el caso de pendiente de fondo al 14%

Fondo D ₁				Fondo D ₂			Fondo D ₃	
1,00000	0,83237	0,55402	0,39991	1,00000	0,70647	0,52092	1,00000	0,76916
0,09434	0,07999	0,05167	0,08695	0,16255	0,14986	0,13877	0,22984	0,21871
0,09318	0,07334	0,07488	0,08937	0,16405	0,15611	0,11811	0,25589	0,20959
0,11361	0,08913	0,06413	0,09560	0,16258	0,15773	0,11966	0,22757	0,22764
0,09664	0,06656	0,07087	0,09560	0,16254	0,15921	0,13089	0,23417	0,23001
0,09080	0,07867	0,06951	0,09192	0,16834	0,16391	0,11488	0,23855	0,24337

Se observa que para una pendiente del 14%, no se cumple la tendencia observada para las pendientes anteriores. Al disminuir D_i/D_{50} el esfuerzo de corte adimensional disminuye para cada fondo, esto pudiese ocurrir debido a otras fuerzas involucradas como por ejemplo la fuerza de sustentación puesto que se conoce que aumenta para pendientes altas y no permite que las partículas se asienten en el fondo (Lamb et al., 2017).

6. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos para lechos con sustrato homogéneo concuerdan con resultados anteriormente publicados (Lamb et al., 2008), además indican una relación inversa entre el esfuerzo de corte adimensional y el tamaño del sustrato.

Para una misma relación de tamaño de fondo se observó que las partículas móviles presentan un aumento en el esfuerzo de corte crítico con el aumento de la pendiente. Esta situación no se observa para la pendiente del 14%, esto concuerda en estudios donde se demostró que la fuerza de sustentación no sigue una tendencia bastante clara cuando se trabaja con pendientes muy pronunciadas donde la profundidad del flujo es del mismo orden de magnitud que el tamaño de las partículas estudiadas (Lamb et al., 2017).

El proceso físico que ocurre para los casos particulares de D_2/D_1 y D_3/D_1 es distinto al resto de los casos estudiados, ya que el espacio que se genera producto del sustrato del fondo en estos casos no era suficiente para que las partículas móviles D_2 y D_3 imbricaran en el fondo, esto no ocurre cuando el fondo es menor y cercano a las partículas móviles como los casos D_4/D_2 , D_3/D_2 y D_4/D_3 . Esto podría relacionar que si las partículas del fondo tienen un diámetro menor (D_3), precisarían un esfuerzo cortante adimensional mayor que para un fondo con un diámetro mayor (D_1), por lo que concluimos que para escenarios bimodal con un fondo D_1 habrá menor esfuerzo cortante adimensional que para los escenarios bimodal con fondo D_3 .

Para un $D_i/D_{50} > 0.8$ las partículas se comportan como si fueran de lecho homogéneo tendiendo a los valores de esfuerzo cortante adimensional de $D_i/D_{50}=1$.

7. REFERENCIAS

- Aguirre-Pe, J., Ochoa, M. A., Olivero, M. L., and Moncada, A. T.** (2002). Efecto de la granulometría en el transporte de sedimentos 23, 5.
- Bathurst, J. C.** (1978). Flow Resistance of Large-Scale Roughness. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(12), 1587-1603.
- Bathurst, J. C., Graf, W. and Cao, H.** (1987). Bed Load Discharge Equations for Steep Mountain Rivers. EV.
- Comiti, F. and Mao, L.** (2012). Recent advances on the dynamics of steep channels. *Gravel Bed Rivers 7: Processes, Tools, Environments*, 353-377.
- Farrán, Y., Caamaño, D. and Monsalve, A.** (2019). Determinación de esfuerzos de Corte crítico para diferentes configuraciones granulométricas en causes de alta pendiente.
- Lamb, M. P., Brun, F. and Fuller, B. M.** (2017). Hydrodynamics of steep streams with planar coarse-grained beds: Turbulence, flow resistance, and implications for sediment transport. *Water Resources Research*, 53(3), 2240-2263.
- Lamb, M. P., Dietrich, W. E. and Venditti, J. G.** (2008). Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
- Lenzi, M. A., D'Agostino, V. and Billi, P.** (1999). Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment. *CATENA*, 36(3), 171-190.
- Montgomery, D. R. and Buffington, J. M.** (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *GSA Bulletin*, 109(5), 596-611.
- Papanicolaou, A. N., Diplas, P., Evangelopoulos, N. and Fotolopoulos, S.** (2002). Stochastic incipient motion criterion for spheres under various bed packing conditions. *128(4)*, 369-380.
- Yager, E.M., Kirchner, J.W. and Dietrich W.E.** (2007). Calculating bed load transport in steep boulder bed channels



Yager, E. M., Schmeckle, and Badoux. (2018). Resistance Is Not Futile: Grain Resistance Controls on Observed Critical Shields Stress Variations *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*—Wiley Online Library.

8. ANEXOS

8.1 Datos de altura de agua y caudal en la toma de ensayos

Tabla 8: Altura de agua y Caudal asociado para lecho homogéneo “D₁”

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00335	0,00374	0,00385	0,00430	0,00395	m ³ /s
	H1	0,01150	0,0125	0,0145	0,0165	0,0155	m
	H2	0,01050	0,0135	0,0135	0,0165	0,0155	m
	H3	0,01250	0,0155	0,0155	0,0175	0,0145	m
	H4	0,01750	0,0145	0,0175	0,0185	0,0175	m
	H5	0,01650	0,0205	0,0215	0,0245	0,0185	m
10%	Caudal	0,00450	0,00366	0,00454	0,00441	0,00444	m ³ /s
	H1	0,0165	0,0165	0,0185	0,0225	0,0185	m
	H2	0,0205	0,0145	0,0255	0,0145	0,0195	m
	H3	0,0145	0,0085	0,0185	0,0165	0,0165	m
	H4	0,0095	0,0065	0,0085	0,0135	0,0125	m
	H5	0,0245	0,0225	0,0305	0,0275	0,0275	m
12%	Caudal	0,00306	0,00391	0,00349	0,00410	0,00385	m ³ /s
	H1	0,0075	0,0125	0,0145	0,0155	0,0125	m
	H2	0,0175	0,0235	0,0155	0,0185	0,0205	m
	H3	0,0185	0,0185	0,0175	0,0175	0,0215	m
	H4	0,0175	0,0135	0,0155	0,0185	0,0225	m
	H5	0,0215	0,0325	0,0225	0,0275	0,0275	m
14%	Caudal	0,00399	0,00325	0,00424	0,00382	0,00404	m ³ /s
	H1	0,0135	0,0125	0,0175	0,0145	0,0125	m
	H2	0,0145	0,0135	0,0155	0,0145	0,0135	m
	H3	0,0125	0,0145	0,0175	0,0155	0,0145	m
	H4	0,0165	0,0175	0,0205	0,0165	0,0145	m
	H5	0,0175	0,0155	0,0205	0,0155	0,0165	m

Tabla 9: Altura de agua y Caudal asociado para lecho homogéneo “D₂”

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00270	0,00196	0,00260	0,00221	0,00223	m ³ /s
	H1	0,0155	0,0135	0,0195	0,0175	0,0145	m
	H2	0,0195	0,0205	0,0165	0,0205	0,0185	m
	H3	0,0225	0,0185	0,0205	0,0155	0,0175	m
	H4	0,0215	0,0165	0,0205	0,0215	0,0195	m
	H5	0,0235	0,0175	0,0225	0,0215	0,0205	m
10%	Caudal	0,00327	0,00358	0,00362	0,00371	0,00349	m ³ /s
	H1	0,0185	0,0135	0,0165	0,0155	0,0145	m
	H2	0,0225	0,0235	0,0195	0,0205	0,0215	m
	H3	0,0185	0,0255	0,0245	0,0255	0,0235	m
	H4	0,0235	0,0275	0,0205	0,0205	0,0215	m
	H5	0,0205	0,0195	0,0235	0,0215	0,0225	m
12%	Caudal	0,00222	0,00237	0,00218	0,00223	0,00229	m ³ /s
	H1	0,0195	0,0165	0,0205	0,0205	0,0195	m
	H2	0,0215	0,0245	0,0215	0,0235	0,0235	m
	H3	0,0225	0,0265	0,0235	0,0245	0,0255	m
	H4	0,0215	0,0275	0,0245	0,0225	0,0265	m
	H5	0,0235	0,0275	0,0245	0,0245	0,0285	m
14%	Caudal	0,00193	0,00197	0,00194	0,00180	0,00199	m ³ /s
	H1	0,0145	0,0165	0,0195	0,0165	0,0175	m
	H2	0,0225	0,0205	0,0205	0,0215	0,0205	m
	H3	0,0215	0,0215	0,0215	0,0205	0,0215	m
	H4	0,0215	0,0205	0,0165	0,0205	0,0225	m
	H5	0,0205	0,0225	0,0225	0,0215	0,0225	m

Tabla 10: Altura de agua y Caudal asociado para lecho homogéneo “D₃”

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00240	0,00262	0,00226	0,00243	0,00259	m3/s
	H1	0,0211	0,0191	0,0221	0,0211	0,0221	m
	H2	0,0191	0,0251	0,0241	0,0271	0,0231	m
	H3	0,0221	0,0261	0,0231	0,0251	0,0251	m
	H4	0,0251	0,0241	0,0251	0,0261	0,0261	m
	H5	0,0261	0,0261	0,0261	0,0291	0,0291	m
10%	Caudal	0,00200	0,00187	0,00185	0,00181	0,00189	m3/s
	H1	0,0111	0,0101	0,0151	0,0091	0,0111	m
	H2	0,0201	0,0231	0,0181	0,0201	0,0191	m
	H3	0,0191	0,0291	0,0201	0,0211	0,0171	m
	H4	0,0251	0,0261	0,0251	0,0191	0,0201	m
	H5	0,0241	0,0241	0,0241	0,0221	0,0221	m
12%	Caudal	0,00184	0,00184	0,00187	0,00199	0,00186	m3/s
	H1	0,0221	0,0141	0,0161	0,0201	0,0161	m
	H2	0,0231	0,0241	0,0221	0,0221	0,0231	m
	H3	0,0261	0,0251	0,0231	0,0241	0,0241	m
	H4	0,0271	0,0251	0,0241	0,0241	0,0251	m
	H5	0,0281	0,0301	0,0271	0,0281	0,0291	m
14%	Caudal	0,00179	0,00178	0,00167	0,00163	0,00171	m3/s
	H1	0,0131	0,0161	0,0111	0,0171	0,0131	m
	H2	0,0201	0,0231	0,0191	0,0201	0,0181	m
	H3	0,0201	0,0211	0,0201	0,0191	0,0211	m
	H4	0,0191	0,0241	0,0211	0,0211	0,0221	m
	H5	0,0211	0,0211	0,0211	0,0181	0,0231	m

Tabla 11: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_2/D_1

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00258	0,00232	0,00243	0,00249	0,00238	m3/s
	H1	0,0105	0,0085	0,0125	0,0075	0,0075	m
	H2	0,0115	0,0155	0,0145	0,0155	0,0125	m
	H3	0,0165	0,0125	0,0135	0,0145	0,0145	m
	H4	0,0135	0,0155	0,0185	0,0165	0,0155	m
	H5	0,0175	0,0165	0,0185	0,0175	0,0175	m
10%	Caudal	0,00320	0,00366	0,00401	0,00409	0,00399	m3/s
	H1	0,0165	0,0165	0,0225	0,0185	0,0175	m
	H2	0,0175	0,0205	0,0205	0,0165	0,0195	m
	H3	0,0125	0,0155	0,0155	0,0155	0,0135	m
	H4	0,0165	0,0105	0,0145	0,0185	0,0235	m
	H5	0,0185	0,0215	0,0185	0,0195	0,0275	m
12%	Caudal	0,00308	0,00288	0,00279	0,00293	0,00305	m3/s
	H1	0,0155	0,0135	0,0145	0,0145	0,0145	m
	H2	0,0145	0,0165	0,0155	0,0155	0,0155	m
	H3	0,0175	0,0155	0,0155	0,0125	0,0135	m
	H4	0,0185	0,0185	0,0165	0,0205	0,0175	m
	H5	0,0215	0,0215	0,0195	0,0215	0,0195	m
14%	Caudal	0,00243	0,00222	0,00229	0,00190	0,00224	m3/s
	H1	0,0085	0,0075	0,0085	0,0065	0,0085	m
	H2	0,0125	0,0125	0,0135	0,0115	0,0135	m
	H3	0,0135	0,0105	0,0145	0,0075	0,0105	m
	H4	0,0125	0,0125	0,0165	0,0125	0,0115	m
	H5	0,0095	0,0085	0,0105	0,0085	0,0115	m

Tabla 12: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_3/D_1

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00238	0,00245	0,00271	0,00251	0,00257	m3/s
	H1	0,0085	0,0085	0,0125	0,0085	0,0105	m
	H2	0,0115	0,0125	0,0115	0,0115	0,0115	m
	H3	0,0125	0,0165	0,0135	0,0135	0,0145	m
	H4	0,0165	0,0135	0,0105	0,0145	0,0155	m
	H5	0,0175	0,0185	0,0185	0,0205	0,0175	m
10%	Caudal	0,00597	0,00494	0,00431	0,00513	0,00422	m3/s
	H1	0,0225	0,0225	0,0145	0,0165	0,0075	m
	H2	0,0245	0,0165	0,0155	0,0175	0,0055	m
	H3	0,0215	0,0065	0,0135	0,0135	0,0075	m
	H4	0,0235	0,0225	0,0175	0,0255	0,0065	m
	H5	0,0275	0,0305	0,0225	0,0255	0,0105	m
12%	Caudal	0,00229	0,00250	0,00235	0,00274	0,00265	m3/s
	H1	0,0105	0,0125	0,0085	0,0185	0,0155	m
	H2	0,0115	0,0135	0,0165	0,0175	0,0145	m
	H3	0,0155	0,0175	0,0185	0,0125	0,0175	m
	H4	0,0155	0,0165	0,0175	0,0175	0,0185	m
	H5	0,0185	0,0205	0,0215	0,0225	0,0215	m
14%	Caudal	0,00165	0,00170	0,00178	0,00176	0,00178	m3/s
	H1	0,0025	0,0105	0,0075	0,0085	0,0075	m
	H2	0,0095	0,0115	0,0105	0,0105	0,0105	m
	H3	0,0095	0,0075	0,0085	0,0075	0,0105	m
	H4	0,0065	0,0125	0,0085	0,0115	0,0095	m
	H5	0,0075	0,0105	0,0095	0,0115	0,0105	m

Tabla 13: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_4/D_1

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00414	0,00425	0,00585	0,00656	0,00471	m ³ /s
	H1	0,0175	0,0175	0,0205	0,0225	0,0185	m
	H2	0,0205	0,0195	0,0235	0,0245	0,0215	m
	H3	0,0185	0,0215	0,0215	0,0275	0,0225	m
	H4	0,0205	0,0205	0,0245	0,0265	0,0245	m
	H5	0,0265	0,0275	0,0325	0,0355	0,0305	m
10%	Caudal	0,00454	0,00371	0,00657	0,00425	0,00357	m ³ /s
	H1	0,0095	0,0165	0,0225	0,0165	0,0165	m
	H2	0,0055	0,0175	0,0275	0,0185	0,0175	m
	H3	0,0075	0,0135	0,0165	0,0205	0,0095	m
	H4	0,0085	0,0125	0,0195	0,0185	0,0255	m
	H5	0,0205	0,0245	0,0315	0,0245	0,0195	m
12%	Caudal	0,00623	0,00633	0,00683	0,00564	0,00709	m ³ /s
	H1	0,0225	0,0235	0,0265	0,0205	0,0245	m
	H2	0,0235	0,0245	0,0275	0,0225	0,0275	m
	H3	0,0255	0,0225	0,0275	0,0235	0,0265	m
	H4	0,0235	0,0265	0,0295	0,0255	0,0295	m
	H5	0,0325	0,0315	0,0335	0,0285	0,0355	m
14%	Caudal	0,00315	0,00277	0,00321	0,00309	0,00305	m ³ /s
	H1	0,0125	0,0125	0,0135	0,0125	0,0125	m
	H2	0,0115	0,0135	0,0135	0,0115	0,0125	m
	H3	0,0125	0,0125	0,0145	0,0135	0,0135	m
	H4	0,0135	0,0145	0,0155	0,0135	0,0145	m
	H5	0,0145	0,0135	0,0145	0,0155	0,0155	m

Tabla 14: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_3/D_2

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00210	0,00264	0,00262	0,00226	0,00288	m3/s
	H1	0,0125	0,0165	0,0155	0,0135	0,0205	m
	H2	0,0135	0,0185	0,0165	0,0185	0,0195	m
	H3	0,0165	0,0175	0,0175	0,0215	0,0195	m
	H4	0,0175	0,0205	0,0185	0,0195	0,0205	m
	H5	0,0175	0,0205	0,0215	0,0215	0,0255	m
10%	Caudal	0,00286	0,00360	0,00340	0,00355	0,00366	m3/s
	H1	0,0145	0,0215	0,0165	0,0215	0,0215	m
	H2	0,0185	0,0225	0,0205	0,0265	0,0255	m
	H3	0,0215	0,0205	0,0215	0,0255	0,0245	m
	H4	0,0165	0,0225	0,0175	0,0265	0,0245	m
	H5	0,0175	0,0245	0,0165	0,0225	0,0265	m
12%	Caudal	0,00213	0,00172	0,00207	0,00205	0,00210	m3/s
	H1	0,0225	0,0165	0,0185	0,0225	0,0205	m
	H2	0,0245	0,0215	0,0205	0,0225	0,0215	m
	H3	0,0225	0,0225	0,0215	0,0205	0,0225	m
	H4	0,0235	0,0195	0,0225	0,0215	0,0245	m
	H5	0,0255	0,0215	0,0235	0,0235	0,0255	m
14%	Caudal	0,00181	0,00180	0,00180	0,00170	0,00179	m3/s
	H1	0,0165	0,0165	0,0185	0,0165	0,0175	m
	H2	0,0155	0,0155	0,0165	0,0205	0,0175	m
	H3	0,0175	0,0185	0,0175	0,0185	0,0185	m
	H4	0,0175	0,0185	0,0185	0,0175	0,0205	m
	H5	0,0185	0,0205	0,0195	0,0185	0,0205	m

Tabla 15: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_4/D_2

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00333	0,00368	0,00424	0,00478	0,00322	m ³ /s
	H1	0,0185	0,0205	0,0225	0,0245	0,0165	m
	H2	0,0225	0,0215	0,0215	0,0255	0,0155	m
	H3	0,0235	0,0225	0,0245	0,0215	0,0165	m
	H4	0,0215	0,0205	0,0235	0,0255	0,0175	m
	H5	0,0225	0,0235	0,0265	0,0265	0,0185	m
10%	Caudal	0,00293	0,00358	0,00311	0,00325	0,00338	m ³ /s
	H1	0,0185	0,0215	0,0215	0,0205	0,0195	m
	H2	0,0245	0,0245	0,0185	0,0195	0,0225	m
	H3	0,0205	0,0255	0,0205	0,0175	0,0205	m
	H4	0,0255	0,0235	0,0255	0,0225	0,0235	m
	H5	0,0165	0,0235	0,0225	0,0215	0,0215	m
12%	Caudal	0,00179	0,00243	0,00222	0,00235	0,00238	m ³ /s
	H1	0,0155	0,0205	0,0175	0,0175	0,0215	m
	H2	0,0165	0,0215	0,0155	0,0195	0,0225	m
	H3	0,0175	0,0235	0,0225	0,0265	0,0215	m
	H4	0,0195	0,0245	0,0265	0,0255	0,0255	m
	H5	0,0185	0,0255	0,0245	0,0235	0,0265	m
14%	Caudal	0,00172	0,00150	0,00157	0,00163	0,00161	m ³ /s
	H1	0,0145	0,0105	0,0135	0,0135	0,0125	m
	H2	0,0165	0,0125	0,0115	0,0145	0,0125	m
	H3	0,0155	0,0165	0,0125	0,0165	0,0115	m
	H4	0,0165	0,0165	0,0145	0,0165	0,0145	m
	H5	0,0175	0,0115	0,0165	0,0145	0,0145	m

Tabla 16: Altura de agua y Caudal asociado para escenarios con lecho bimodal D_4/D_3

		ensayo1	ensayo2	ensayo3	ensayo4	ensayo5	
8%	Caudal	0,00203	0,00204	0,00216	0,00213	0,00203	m ³ /s
	H1	0,0161	0,0101	0,0111	0,0161	0,0161	m
	H2	0,0201	0,0191	0,0231	0,0171	0,0191	m
	H3	0,0231	0,0201	0,0211	0,0211	0,0211	m
	H4	0,0231	0,0211	0,0271	0,0221	0,0241	m
	H5	0,0261	0,0261	0,0271	0,0211	0,0251	m
10%	Caudal	0,00183	0,00169	0,00174	0,00163	0,00174	m ³ /s
	H1	0,0161	0,0111	0,0111	0,0071	0,0121	m
	H2	0,0241	0,0211	0,0241	0,0191	0,0221	m
	H3	0,0251	0,0231	0,0261	0,0211	0,0211	m
	H4	0,0241	0,0221	0,0111	0,0221	0,0241	m
	H5	0,0261	0,0231	0,0241	0,0251	0,0231	m
12%	Caudal	0,00168	0,00174	0,00170	0,00157	0,00170	m ³ /s
	H1	0,0151	0,0161	0,0131	0,0161	0,0171	m
	H2	0,0201	0,0221	0,0181	0,0171	0,0191	m
	H3	0,0201	0,0221	0,0201	0,0171	0,0211	m
	H4	0,0191	0,0231	0,0211	0,0211	0,0221	m
	H5	0,0211	0,0211	0,0211	0,0201	0,0231	m
14%	Caudal	0,00163	0,00160	0,00154	0,00160	0,00156	m ³ /s
	H1	0,0131	0,0111	0,0161	0,0171	0,0171	m
	H2	0,0191	0,0161	0,0201	0,0191	0,0201	m
	H3	0,0171	0,0181	0,0191	0,0171	0,0201	m
	H4	0,0191	0,0181	0,0171	0,0211	0,0191	m
	H5	0,0181	0,0191	0,0181	0,0171	0,0211	m

8.2 Datos adimensionales utilizados para la elaboración de gráficos

Tabla 17: Esfuerzo de corte adimensional para fondo D_1

	8%	10%	12%	14%
D_1/D_1	0,04989	0,07633	0,08869	0,09434
D_1/D_1	0,05521	0,06238	0,10589	0,09318
D_1/D_1	0,05917	0,08901	0,09166	0,11361
D_1/D_1	0,06623	0,08352	0,10306	0,09664
D_1/D_1	0,05850	0,08353	0,10962	0,09080
D_2/D_1	0,05541	0,08004	0,10251	0,07999
D_2/D_1	0,05468	0,08274	0,10040	0,07334
D_2/D_1	0,06122	0,06372	0,09607	0,08913
D_2/D_1	0,05685	0,08628	0,09929	0,06656
D_2/D_1	0,05392	0,09748	0,09505	0,07867
D_3/D_1	0,05338	0,11295	0,08553	0,05167
D_3/D_1	0,05559	0,09526	0,09537	0,07488
D_3/D_1	0,05335	0,08219	0,09754	0,06413
D_3/D_1	0,05486	0,09527	0,10392	0,07087
D_3/D_1	0,05562	0,03889	0,10288	0,06951
D_4/D_1	0,07630	0,05035	0,13724	0,08695
D_4/D_1	0,07822	0,07949	0,13825	0,08937
D_4/D_1	0,08842	0,10660	0,15282	0,09560
D_4/D_1	0,08842	0,09127	0,13073	0,09560
D_4/D_1	0,08528	0,15444	0,15186	0,09192

Tabla 18: Esfuerzo de corte adimensional para fondo D_2

	8%	10%	12%	14%
D_2/D_2	0,09458	0,11916	0,14914	0,16255
D_2/D_2	0,08123	0,12531	0,16582	0,16405
D_2/D_2	0,09210	0,12020	0,15631	0,16258
D_2/D_2	0,08958	0,11922	0,15749	0,16254
D_2/D_2	0,08458	0,11924	0,16698	0,16834
D_3/D_2	0,07835	0,11042	0,17157	0,14986
D_3/D_2	0,09282	0,13561	0,14979	0,15611
D_3/D_2	0,08926	0,10811	0,15631	0,15773
D_3/D_2	0,09368	0,14720	0,16137	0,15921
D_3/D_2	0,10330	0,14717	0,16652	0,16391
D_4/D_2	0,10355	0,12634	0,12822	0,13877
D_4/D_2	0,10354	0,14602	0,16410	0,11811
D_4/D_2	0,11191	0,14803	0,15285	0,11966
D_4/D_2	0,11598	0,13264	0,16043	0,13089
D_4/D_2	0,08286	0,13886	0,16657	0,11488

Tabla 19: Esfuerzo de corte adimensional para fondo D_3

	8%	10%	12%	14%
D_3/D_3	0,15600	0,17361	0,25714	0,22984
D_3/D_3	0,16430	0,19349	0,24297	0,25589
D_3/D_3	0,16429	0,17822	0,23206	0,22757
D_3/D_3	0,17370	0,16106	0,24299	0,23417
D_3/D_3	0,17020	0,15789	0,24108	0,23855
D_4/D_3	0,15294	0,20187	0,20480	0,21871
D_4/D_3	0,13782	0,17866	0,22187	0,20959
D_4/D_3	0,15416	0,17227	0,20100	0,22764
D_4/D_3	0,13910	0,16903	0,19720	0,23001
D_4/D_3	0,14920	0,18173	0,21813	0,24337