



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES**

**“Variabilidad del esfuerzo de corte crítico en cauces de alta pendiente”.**

**GABRIEL BENJAMÍN DAVINSON CHÁVEZ**

**2020**





**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES**

**“Variabilidad del esfuerzo de corte crítico en cauces de alta pendiente”.**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía:** Dr. Angel Darío Monsalve Sepúlveda

**GABRIEL BENJAMÍN DAVINSON CHÁVEZ**

**2020**

**VARIABILIDAD DEL ESFUERZO DE CORTE CRÍTICO EN CAUCES DE ALTA  
PENDIENTE**

**GABRIEL BENJAMÍN DAVINSON CHÁVEZ**

**COMISIÓN EXAMINADORA**

**ANGEL MONSALVE**

**Profesor Guía**

**DIEGO CAAMAÑO**  
**Académico Evaluador**

**MAXIMILIANO LIZANA**  
**Académico Evaluador**

**Calificación trabajo escrito :**

**Calificación examen :**

**Calificación final :**

## **Agradecimientos**

A mi familia, mi madre, mi padre y mi hermana, que terminan siendo los pilares de lo que soy hoy en día, que, sin su apoyo incondicional, no se podría llegar tan lejos como lo estoy ahora, gracias de todo corazón, por todo su sacrificio y su esfuerzo, son lo más importante por lejos.

A mis amigos, la gente que estuvo a lo largo de seis años compartiendo conmigo en esta estadía universitaria, que, sin ellos, quizás tardaba más y no se hubiera pasado tan bien como se pasó. Los cabros son muy grandes, a toda la generación (y las otras también), el Matriarcado y los Sexiciviles, por siempre en el cora.

A mis amigos de siempre, con los que bebí, con los que jugué, bailé, con los que compartí y considero de los pilares más importante en mi vida.

Al profe Angel Monsalve, quien me aceptó en este proyecto de titulación, fue mi guía y me facilitó las herramientas para que esto salga a flote, compartiendo su experiencia y conocimientos de la mejor de las formas.

A la Universidad Católica de la Santísima Concepción, al profe Diego Caamaño, que nos facilitó sus instalaciones, su laboratorio de hidráulica para trabajar en este proyecto, y a los estudiantes, el Karells y la Maite que, sin ellos, mi estadía en Concepción hubiera sido muchísimo más larga de la que fue, son grandes.

Y a todo aquel que se preocupó y dedicó unas palabras de apoyo para que pudiera terminar, permitiéndome estar donde estoy ahora.

## Resumen

En el presente trabajo se obtiene el esfuerzo de corte crítico, el cual se define como el esfuerzo de corte necesario para mover las partículas de sedimento en el fondo de un lecho, por medio de experimentos de laboratorio que simulan un flujo de alta pendiente. Se consideran escenarios con pendientes entre 4% y 7% con presencia de bolones y se comparan con casos idénticos en ausencia de ellos. De este modo, se determina la influencia de la presencia de grandes elementos de rugosidad en las condiciones necesarias para iniciar el transporte de sedimento.

El estudio consta de trabajo en laboratorio, realizado en la Universidad Católica de la Santísima Concepción, y de modelación numérica donde se combina la técnica de *Structure from Motion* y el modelo numérico de flujo, NAYS-2DH.

Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico de flujo representan el esfuerzo de corte que realmente está siendo aplicado a las partículas que comienzan su movimiento, ya que se separa la fracción inmóvil, permitiendo no considerar el efecto de los bolones. Si se asume flujo uniforme, el esfuerzo de corte es mayor, ya que si se contempla la influencia de los bolones.

En general, los valores de esfuerzo de corte críticos adimensionales están en el rango de 0.0211 a 0.049, valores típicos de un río de baja pendiente. Por otro lado, independiente de la metodología, los resultados no muestran una tendencia en el grado de dependencia del transporte, abriendo la puerta para un futuro análisis de la metodología aplicada, considerando otras variables, como por ejemplo, la turbulencia generada por la presencia de bolones.

## Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Hipótesis propuesta	1
1.3. Objetivos del trabajo	1
1.3.1. Objetivo general	1
1.3.2. Objetivos específicos	2
Capítulo 2. Antecedentes Generales	4
2.1. Modelo numérico	5
2.1.1. Descripción de NAYS-2DH	5
Capítulo 3. Metodología	7
3.1. Trabajo en laboratorio	7
3.2. Procesamiento de datos	10
3.2.1. Obtención de la topografía	10
3.2.2. Obtención del esfuerzo de corte	13
Capítulo 4. Resultados y Discusión	17
4.1. Gráficos por pendiente	20
4.1.1. Gráfico de los casos con bolones, obtenidos con datos del modelo numérico	20
4.1.2. Gráfico de los casos con bolones, asumiendo flujo uniforme	21
Capítulo 5. Conclusiones	25
Nomenclatura	26
Bibliografía	27

## Índice de figuras

<b>Figura 3.1.</b> Obstáculos unidos al canal hidráulico del laboratorio.	9
<b>Figura 3.2.</b> Regletas en la pared del canal para medir profundidad.	10
<b>Figura 3.3.</b> A la izquierda, fotografía tomada, a la derecha, fotografía cortada.	11
<b>Figura 3.4.</b> Nube de puntos resultado de VisualSFM, con curvatura a lo largo del lecho.	12
<b>Figura 3.5.</b> Topografía del lecho mal alineada, graficadas en MATLAB.	12
<b>Figura 3.6.</b> Topografía del lecho alineada correctamente y discretizada, vista en planta.	13
<b>Figura 3.7.</b> Topografía del lecho alineada correctamente y discretizada, vista en elevación.	13
<b>Figura 3.8.</b> Nube de puntos que se usa como topografía para iRIC, visualizada en Meshlab.	14
<b>Figura 3.9.</b> Topografía cargada a iRIC con los obstáculos en su lugar.	14
<b>Figura 3.10.</b> Post-proceso en iRIC, visualizando el esfuerzo de corte y la profundidad.	15
<b>Figura 4.1.</b> $D_i/D_{50} v/s \tau_{ci}^*$ para pendientes de 4, 5, 6 y 7%, con datos obtenidos del modelo numérico.	20
<b>Figura 4.2.</b> $D_i/D_{50} v/s \tau_{ci}^*$ para pendientes de 4, 5, 6 y 7%, con datos asumiendo flujo uniforme.	21
<b>Figura 4.3.</b> Pendiente $v/s \tau_{c50}^*$ para los tres casos en estudio.	22
<b>Figura 4.4.</b> Pendiente $v/s \gamma$ para los tres casos en estudio.	22

## Índice de tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Tamaños de grano utilizados en los experimentos.	7
<b>Tabla 3.2.</b> Combinaciones de experimentos realizados.	8
<b>Tabla 4.1.</b> Esfuerzo de corte para cada caso ( $\text{N/m}^2$ )	17
<b>Tabla 4.2.</b> Esfuerzo de corte crítico adimensional.	18
<b>Tabla 4.3.</b> Esfuerzo de corte con el efecto de los bolones incluido, medido en laboratorio ( $\text{N/m}^2$ ).	19
<b>Tabla 4.4.</b> Esfuerzo de corte adimensional con el efecto de los bolones incluido, medido en laboratorio.	19
<b>Tabla 4.5.</b> Pendientes estudiadas y valores de $\tau_{c50}^*$ y $\gamma$ en escenarios con bolones.	21
<b>Tabla 4.6.</b> Pendientes estudiadas y valores de $\tau_{c50}^*$ y $\gamma$ en escenarios sin bolones.	21
<b>Tabla 4.7.</b> Pendientes estudiadas y valores de $\tau_{c50}^*$ y $\gamma$ en escenarios con bolones, asumiendo flujo uniforme.	22

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## **Capítulo 1. Introducción**

### **1.1. Descripción del problema**

A lo largo de los años los cuerpos fluviales han sido primordiales para la prosperidad, desarrollo y calidad de vida de las personas, siendo esta una de las razones de peso para que las civilizaciones se ubiquen en zonas aledañas a ríos. Sin embargo, rara vez se considera la dinámica de estos cuerpos hídricos, por ejemplo, el movimiento del lecho y del cauce producto del transporte de sedimentos.

Predecir las condiciones que generan el movimiento inicial del sedimento en un lecho es uno de los problemas fundamentales en sedimentología y geomorfología (Lamb *et al.*, 2008). En ese marco, los ríos no son entidades que se comportan como un canal fijo. Por el contrario, son sistemas activos y dinámicos. El determinar la condición crítica, es decir el esfuerzo de corte aplicado a las partículas requerido para que éstas salgan de su estabilidad, en la que un lecho pasa de un estado inactivo a uno activo, es un proceso complejo.

El modelo estándar de la literatura especializada predice una reducción en la estabilidad con un aumento en la pendiente, ya que se agrega una componente de la fuerza de gravedad. Sin embargo, el estudio de Lamb *et al.* (2008) afirma que el esfuerzo de corte crítico de Shields aumenta con la pendiente. Esto indica que partículas del mismo tamaño serían más estables en pendientes empinadas. Este aumento en el esfuerzo de corte crítico podría ser ficticio, puesto que este último estudio incluye el efecto de los bolones (partículas de sedimento mayores a 256 milímetros) en el flujo promedio de un tramo, por lo tanto, no separa fracciones de sedimento potencialmente móvil e inmóvil. Producto de lo anterior, se hace necesario conocer los esfuerzos de corte crítico en el sedimento en las zonas donde el sedimento es efectivamente móvil, ya que es este el que puede generar cambios geomorfológicos.

### **1.2. Hipótesis propuesta**

El esfuerzo de corte crítico es aparentemente alto en cauces de alta pendiente o ríos empinados, ya que no se diferencia entre las fracciones móviles e inmóviles del sedimento.

### **1.3. Objetivos del trabajo**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Cuantificar el esfuerzo de corte crítico en cauces de alta pendiente en escenarios con y sin bolones.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Comparar las estimaciones de esfuerzos de corte obtenidos mediante el uso de modelos numéricos de flujo y los datos medidos en laboratorio.
- Comparar el esfuerzo de corte crítico obtenido en escenarios con y sin bolones.
- Desarrollar una expresión matemática para el cálculo del esfuerzo de corte crítico en función de la pendiente y la distribución del tamaño de grano.

**CAPÍTULO 2**  
**ANTECEDENTES GENERALES**

## Capítulo 2. Antecedentes Generales

En sedimentología, geomorfología e hidráulica, las predicciones del transporte de sedimento se hacen necesarias en muchos casos prácticos y en proyectos de conservación o restauración de cauces. Por ejemplo, dirigir el sedimento a través de las distintas redes fluviales, modelar la erosión del río en su lecho de roca, restaurar la funcionalidad y hábitat de un río, o mitigar flujos de escombros iniciados por el lecho, etc. Los ríos de alta pendiente son parte importante de la red fluvial, siendo su comportamiento con el lecho un gran factor a considerar para distintas disciplinas científicas. Estos ríos tienen una amplia distribución granulométrica que incluyen granos finos relativamente, móvil y sedimento grueso que es relativamente inmóvil. Los granos más grandes son normalmente distribuidos en escalones, los cuales sobresalen de la superficie del flujo.

Las ecuaciones de transporte de sedimentos solo actúan de manera aceptable en canales pronunciados, cuando todos los tamaños de granos se mueven durante grandes inundaciones (Yager *et al.*, 2012). El esfuerzo de corte crítico adimensional o el parámetro de Shields, se define como se muestra en la *ecuación (2.1)*.

$$\tau_{ci}^* = \frac{\tau_{ci}}{(\rho_s - \rho)gD_i} \quad (2.1)$$

En donde  $\tau_{ci}$  es el esfuerzo de corte crítico de transporte incipiente para un determinado tamaño de grano de interés  $D_i$ ;  $g$  es la aceleración de gravedad y  $\rho_s$  con  $\rho$  son las densidades del sedimento y del fluido respectivamente. Según el estudio de Buffington y Montgomery (1997), que considera la recolección de datos y análisis de estudios de ocho décadas de transporte incipiente, el esfuerzo de corte crítico adimensional varía entre 0.03 y 0.086 en ríos de baja pendiente.

El presente estudio se desarrolló conjuntamente entre la Universidad de La Frontera y la Universidad Católica de la Santísima Concepción. En ese marco, la tesis de magíster de la ingeniera Yasnuri Farrán Villalobos (Farrán, 2019), que se concentra en la determinación de la influencia de la pendiente en el esfuerzo de corte crítico, entrega los resultados para experimentos idénticos a los desarrollados en este estudio, sin la presencia de los bolones.

## 2.1. Modelo numérico

### 2.1.1. Descripción de NAYS-2DH

El uso de software en el modelamiento hidráulico es de gran utilidad. Mediante las simulaciones se pueden tomar decisiones y ejecutar acciones para un correcto aprovechamiento de los recursos disponibles y al mismo tiempo, reducir distintos riesgos producto de fenómenos naturales o provocados por el hombre como modificaciones al cauce o extracciones de áridos. En este estudio se usó NAYS-2DH, incluido dentro de la plataforma iRIC (*International River Interface Cooperative*), interfaz desarrollada por el profesor Yasuyuki Shimizu de la Universidad de Hokkaido en Japón y el Dr. Jonathan Nelson del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Nays2DH es un modelo computacional que simula un flujo horizontal bidimensional, transporte de sedimentos y cambios morfológicos en el lecho de un río. El *solver* posee varias funciones, por ejemplo, implementa módulos de confluencias de ríos, modelos de erosión de riberas, modelo de granulometría no uniforme, modelos de lecho fijo o variable y la función de partida de simulación desde un estado antes simulado (Chávez, 2016).

Las características del modelo hidrodinámico son, entre otras, que permite realizar cálculos que implica confluencias del canal principal y tributario, en el caso del tratamiento del término de la turbulencia es posible utilizar la viscosidad de remolinos constante, el modelo de ecuación cero o un cierre de tipo  $K - \epsilon$ . Además, contiene un esquema de diferencias finitas que puede ser adoptado a los términos de advección en las ecuaciones de momentum (tiene la opción de esquema *upwind* de primer orden y el esquema de interpolación cúbica de propagación CIP), la configuración de las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo, incluyen condiciones periódicas o constantes, elevación del nivel de agua o caudal de entrada. Para el cálculo del eje hidráulico inicial, es posible seleccionar condiciones de pendiente constante, flujo uniforme y no uniforme, la fricción de fondo es evaluada a través de la batimetría detallada y el coeficiente de Manning ( $n$ ), introduciendo en cada celda del modelo un valor “ $n$ ” distinto si se precisa. Algunas celdas pueden ser configuradas de forma especial, de modo que simulen obstáculos, tales como cepas de puentes o formaciones rocosas especiales (Chávez, 2016).

**CAPÍTULO 3**  
**METODOLOGÍA**

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1. Trabajo en laboratorio

Para el trabajo en laboratorio se realizan una serie de experimentos con fines de estudiar la relación entre el esfuerzo de corte crítico con i) la pendiente y ii) la granulometría del lecho en presencia de bolones. Los experimentos contemplan un rango de pendientes entre 4% y 7% en intervalos de 1%, con presencia de bolones, representados por trozos cilíndricos de madera con un diámetro de 6.35 cm, bajo una granulometría constante (un único  $D_{50}$ ) que consiste de 4 tamaños de grano distintos (4 valores de  $D_i$ ), detallados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Tamaños de grano utilizados en los experimentos.

Tipo de partícula	Tamaño en mm.
D1	12.5
D2	9.5
D3	6.3
D4	4.75

Los experimentos fueron llevados a cabo en un laboratorio de hidráulica ubicado en las dependencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, en el campus San Andrés de la ciudad de Concepción. El laboratorio cuenta con un canal hidráulico de 5 metros de largo y 0.32 metros de ancho, con posibilidad de cambiar la pendiente longitudinal de -3% hasta 7%. Los experimentos están basados en el hecho de que el esfuerzo de corte crítico varía en función de la distribución del tamaño de grano que subyace y rodea a un determinado grano, lo que se suele expresar mediante el uso de las funciones de escondimiento (*hiding-functions*). La función de escondimiento permite estimar el esfuerzo de corte necesario para iniciar el movimiento de un determinado tamaño de grano si se conoce aquel requerido para mover el tamaño mediano en base a la razón  $D_i/D_{50}$ . Comúnmente se expresa de la forma que muestra la *ecuación (3.1)*:

$$\tau_{ci}^* = \tau_{c50}^* \cdot \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^{-\gamma} \quad (3.1)$$

donde el exponente  $\gamma$  indica el grado de dependencia del transporte con la razón  $D_i/D_{50}$ . Si  $\gamma = 0$  hay una independencia del tamaño de grano, si  $\gamma = 1$  se tiene una condición idéntica de umbral y un valor entre 0 y 1 indica transporte de sedimento selectivo.

Se realizan una serie de experimentos de laboratorio en donde se definen cuatro escenarios de 4, 5, 6 y 7% de pendiente, manteniendo en el lecho una granulometría constante. El objetivo de cada experimento es determinar el esfuerzo de corte ( $\tau_{ci}^*$ ) necesario para movilizar una partícula de tamaño  $D_i$ . Para esto, se define un área de estudio que consta de 30 cm de largo y 30 cm de ancho ubicada en la mitad del canal a disposición. Posteriormente, se registran fotografías (entre 75 y 80 fotos por experimento) a lo largo de la zona de interés, desde arriba del canal y que son utilizadas para crear la topografía como se describe más adelante. Luego, se procede con el experimento. Se enciende la bomba y se incrementa gradualmente el caudal, aumentando la frecuencia de la bomba en intervalos de 0.5, este aumento se detiene para una condición que corresponde a una probabilidad de comienzo del movimiento igual a un 2%. Las muestras de partículas móviles en el lecho fueron de 200 granos móviles, las cuales se marcaron de distintos colores identificables de acuerdo al tamaño. Consecuentemente, el 2% corresponde a que 4 de estas 200 partículas se comiencen a mover (Papanicolaou *et al*, 2002). Es decir, esta condición equivale precisamente a la definición del esfuerzo de corte crítico.

El método del 2% fue propuesto por Papanicolaou *et al.* (2002) con el objetivo de obtener mediciones objetivas y replicables a distintos casos. Una vez que se mueve el 2% de granos, se da por finalizado el experimento, se registran las variables hidráulicas de caudal y alturas de agua. Luego se prepara una nueva área de estudio, aumentando en 1% la pendiente y repitiendo el procedimiento y las observaciones. Lo anterior hasta llegar a la máxima pendiente de estudio (7%). Una vez completado el ciclo de pendientes, se cambia al otro tamaño  $D_i$ , y se repiten los ensayos para las 4 pendientes antes indicadas. De esta manera, los experimentos propuestos involucran 4 pendientes y 4 razones  $D_i/D_{50}$ , generando un total de 32 experimentos (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2.** Combinaciones de experimentos realizados.

<b>Fondo</b>	<b>Móvil</b>	<b>Pendiente</b>			
D1	D1	4%	5%	6%	7%
	D2	4%	5%	6%	7%
	D3	4%	5%	6%	7%
	D4	4%	5%	6%	7%
D2	D2	4%	5%	6%	7%
	D3	4%	5%	6%	7%
	D4	4%	5%	6%	7%
D3	D4	4%	5%	6%	7%

Para efectos de nomenclatura, los experimentos fueron nombrados de la siguiente manera:

$$\text{Caso} = D_i D_j X \quad (3.2)$$

en donde  $D_i$  es el tamaño de las partículas fijas colocadas en el fondo del lecho,  $D_j$  es el tamaño de las partículas móviles que se estudian y  $X$  es la pendiente a la cual está sometido el experimento, por ejemplo,  $D_2 D_3_5$  significaría que el fondo es del tamaño  $D_2$  (9.5 mm), con 200 partículas móviles del tamaño  $D_3$  (6.3 mm) y con un 5% de pendiente.

El 72% de los experimentos que se muestran en la Tabla 3.2, fueron realizados por Yasnuri Farrán Villalobos (Farrán, 2019) en el marco de su tesis de magíster en la Universidad Católica de la Santísima Concepción, su base de datos fue compartida y el 28% restante de experimentos se completaron en una primera visita a la UCSC durante el mes de junio del año 2019. La segunda ronda de experimentos realizados, consta de la misma combinación de experimentos sumando 4 más, que son los casos con el fondo  $D_3$  y el sedimento móvil del mismo tamaño  $D_3$ , dando un total de 36 experimentos, pero esta vez, con bolones incluidos en el lecho de la zona de estudio. Estos bolones fueron representados por trozos de madera de polines de 2.5" de diámetro (6.35 cm) y fueron ubicados a lo largo de todo el canal de laboratorio como se muestra en la **Figura 3.1**. Esta disposición y espaciado escalonado corresponde a un régimen de flujo aislado, en donde las estelas entre los bolones consecutivos no interfieran (Monsalve y Yager, 2017).

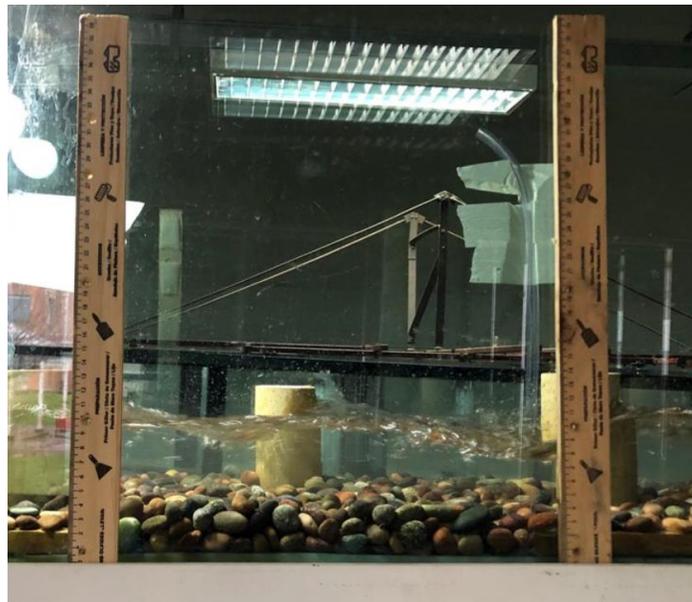


**Figura 3.1.** Obstáculos unidos al canal hidráulico del laboratorio.

Las variables hidráulicas que fueron medidas son la profundidad del agua y el caudal. La profundidad del agua se midió usando regletas dispuestas en las paredes de vidrio del canal, tal como se puede apreciar en la Figura 3.2 y el caudal ( $Q$ ) se obtuvo gracias a una curva ajustada a la frecuencia ( $f$ ) con la que la bomba impulsa el agua, expuesta en la *ecuación (3.3)*:

$$Q = 0.0028 \cdot f - 0.0092 \quad (3.3)$$

Estas mediciones se usaron para calibrar y validar el modelo numérico que se utilizó para obtener el esfuerzo de corte crítico, que se explicará con mayor detalle más adelante.



**Figura 3.2.** Regletas en la pared del canal para medir profundidad.

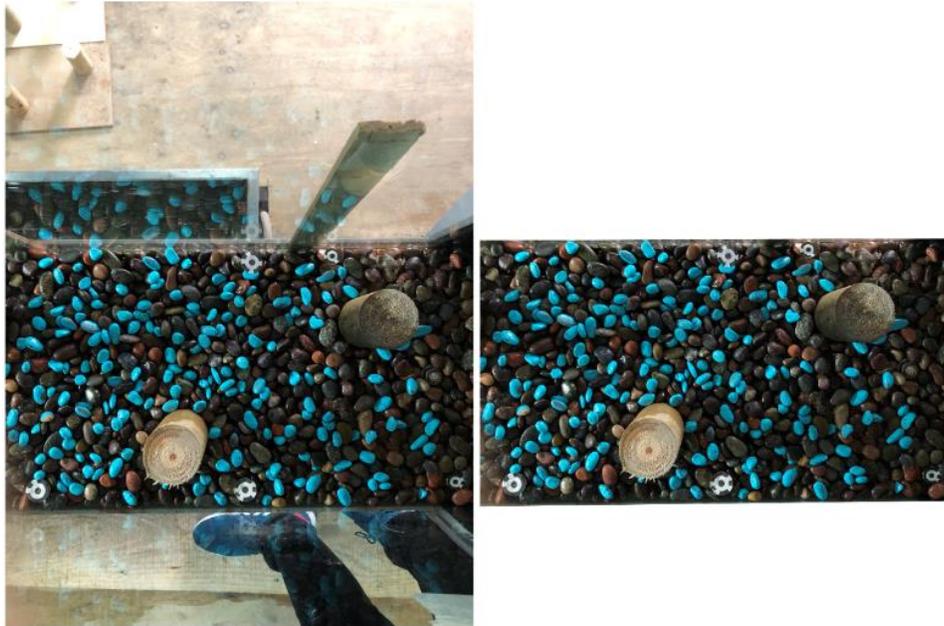
### 3.2. Procesamiento de datos

El procesamiento se puede dividir en dos etapas, i) la etapa de obtención de la topografía y ii) la de obtención del esfuerzo de corte a través del modelamiento hidráulico.

#### 3.2.1. Obtención de la topografía

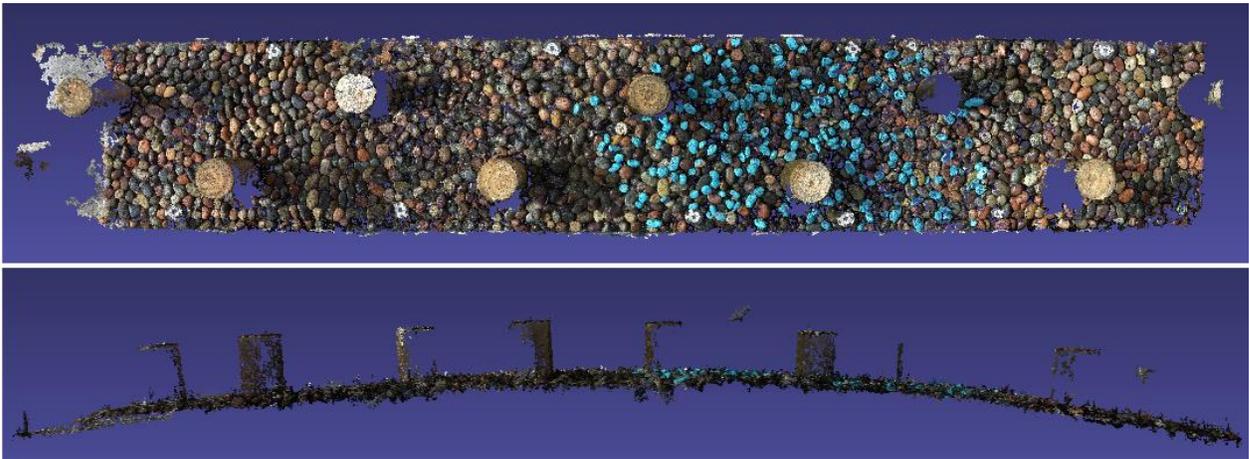
La técnica utilizada para obtener la topografía del lecho, es *Structure From Motion (SFM)*, una técnica muy popular en el área de las geociencias (Morgan y Brogan, 2016). En este caso se usó para obtener la topografía del lecho usando fotografías mediante el *software* VisualSFM (Wu,

2019), el cual permite crear nubes de puntos en tres dimensiones. En el pre-proceso las fotografías fueron cortadas, dejando sólo el canal y su lecho (Figura 3.3). Se usó Paint.NET (Brewster, 2019) (de libre acceso) para este fin. Esto se hace ya que si se consideran las fotos completas, se sobrecarga el programa y no cumple la función de generar una nube de puntos coherente.



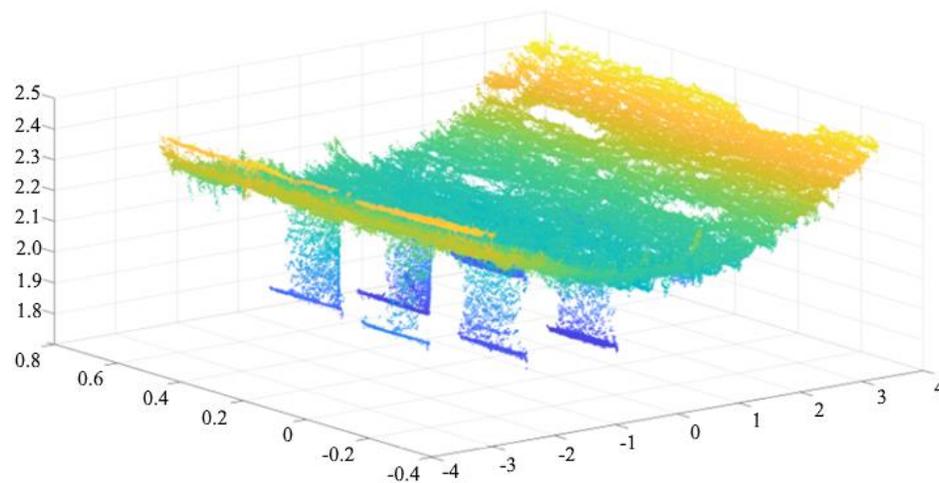
**Figura 3.3.** A la izquierda, fotografía tomada, a la derecha, fotografía cortada.

Una vez obtenida la nube de puntos, se procede a observar el resultado en el *software* Meshlab (Cignoni *et al*, 2008), un sistema *open source* que permite procesar y editar en tres dimensiones mallas de puntos. En Meshlab se limpia la nube de puntos, pues puede existir alguno que no tenga sentido o que esté muy alejado de la topografía real. Además permite manualmente detectar errores y eliminarlos digitalmente. Finalmente se extrae la nube de puntos en un archivo xyz y se analiza si existe alguna curvatura artificial a lo largo del lecho (Figura 3.4). Como se sabe que debe ser recto, se fuerza la rectificación final usando MATLAB (The MathWorks, Inc., 2017).

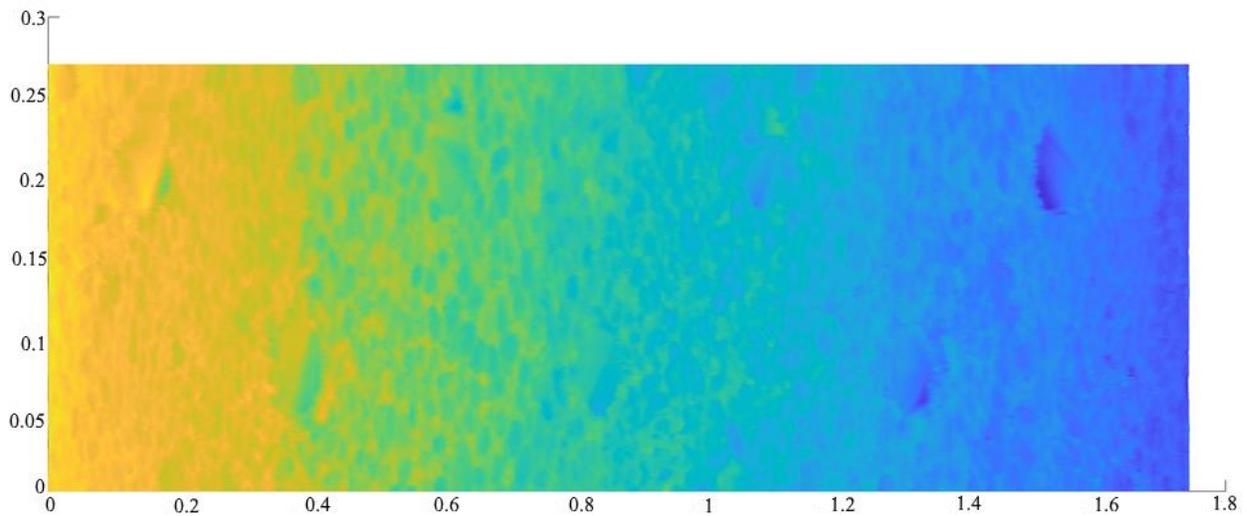


**Figura 3.4.** Nube de puntos resultado de VisualSFM, con curvatura a lo largo del lecho.

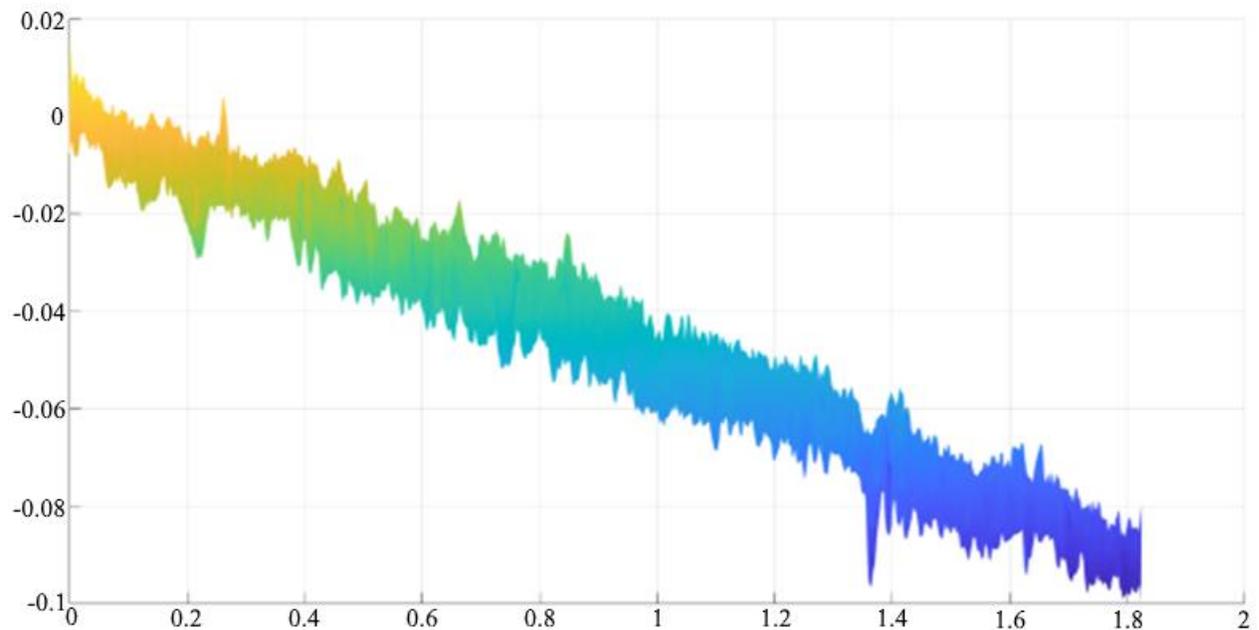
Adicionalmente, topografías mal alineadas en el plano (Figura 3.5) se corrigen usando un código desarrollado en MATLAB. Finalmente se simplifica la cantidad de puntos para hacer un análisis más ordenado. En este paso se limpia y proyecta la superficie, obteniendo un resultado final tal como lo muestran las Figuras 3.6 y 3.7.



**Figura 3.5.** Topografía del lecho mal alineada, graficadas en MATLAB.



**Figura 3.6.** Topografía del lecho alineada correctamente y discretizada, vista en planta.



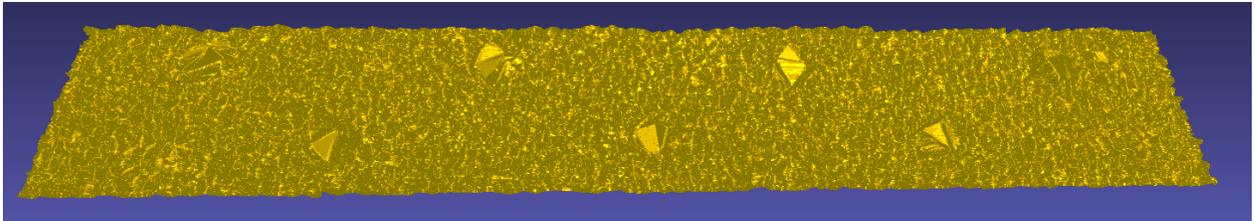
**Figura 3.7.** Topografía del lecho alineada correctamente y discretizada, vista en elevación.

Esta nube de puntos resultante es la que funciona y es útil, con un tamaño del archivo manejable para ser procesado en el modelamiento hidráulico.

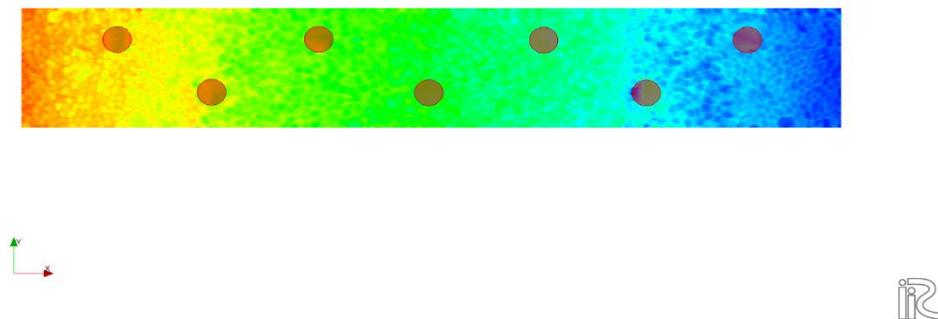
### 3.2.2. Obtención del esfuerzo de corte

En esta investigación se utilizó NAYS-2DH para estimar el esfuerzo de corte. La nube de puntos, similar a la de la Figura 3.8, se importa en formato tpo para generar la batimetría, los obstáculos se

ingresan digitalmente dentro del modelo y corresponden a una zona impermeable que obliga al flujo a desviarse ante su presencia (Figura 3.9).



**Figura 3.8.** Nube de puntos que se usa como topografía para iRIC, visualizada en Meshlab.



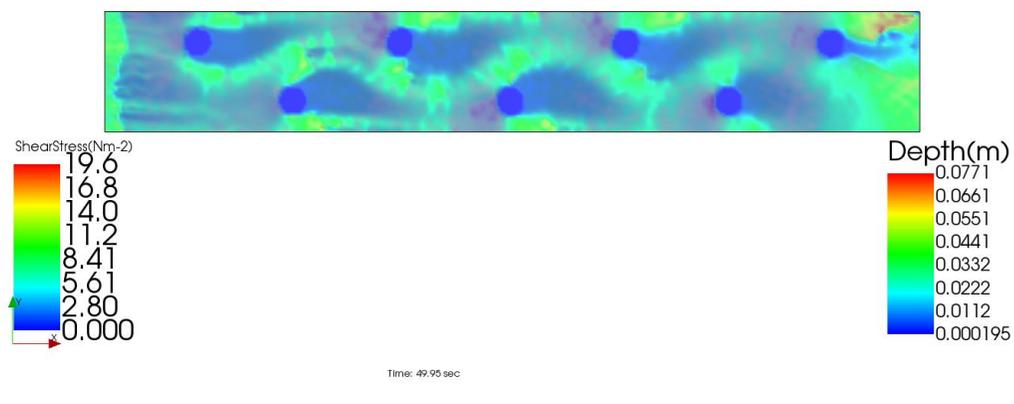
**Figura 3.9.** Topografía cargada a iRIC con los obstáculos en su lugar.

Una vez cargada la topografía, se procede a continuar con la creación de la malla de cálculo. El ancho de la malla se ajusta para maximizar el área de escurrimiento. Como nunca es igual al ancho total, se ajusta el caudal para cada caso a la siguiente relación:

$$Q_{\text{malla}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = Q_{\text{real}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot \left( \frac{\text{Ancho de la malla [m]}}{0.32 \text{ m}} \right) \quad (3.4)$$

Para la calibración del modelo, se varía el coeficiente de rugosidad de Manning, hasta que el resultado de la profundidad medida sea lo suficientemente cercana a la profundidad que entrega NAYS-2DH.

Con los coeficientes de Manning ajustados en cada caso se ejecuta el programa para un tiempo que asegure la estabilidad de la solución numérica. Entonces, se observó que 50 segundos fueron suficientes para asegurar la convergencia y la fluctuación de las variables alrededor de un promedio en cada experimento. Finalmente, el esfuerzo de corte corresponde a aquel aplicado sobre el área de estudio y promediado durante el tiempo de cálculo, visualizando los resultados de forma gráfica en la plataforma iRIC (Figura 3.10).



**Figura 3.10.** Post-proceso en iRIC, visualizando el esfuerzo de corte y la profundidad.

Los esfuerzos de corte calculados con el modelo numérico no contemplan la influencia de los bolones. Para obtener los esfuerzos de corte, contemplando el efecto de los bolones y así compararlos, se asume flujo uniforme dentro del tramo de estudio y por lo tanto se tiene que el esfuerzo de corte promedio está dado por la *ecuación (3.5)*:

$$\tau = \rho ghS \tag{3.5}$$

donde S es la pendiente y h es el promedio de los puntos medidos en laboratorio como profundidad del agua.

# **CAPÍTULO 4**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Capítulo 4. Resultados y Discusión**

De los 36 experimentos realizados se utilizaron 25 (Tabla 4.1). En los restantes 11 casos no se cumplieron las condiciones de movimiento del sedimento. Cabe destacar que el esfuerzo de corte calculado, no contempla las zonas en donde se ubican los bolones. Ahí el esfuerzo de corte se hace cero ya que al ser definidos como obstáculos el agua no está pasando.

**Tabla 4.1.** Esfuerzo de corte para cada caso (N/m<sup>2</sup>)

Casos	Esfuerzo de corte (N/m <sup>2</sup> )	Casos	Esfuerzo de corte (N/m <sup>2</sup> )
D1D1_6	7.25	D2D3_7	8.14
D1D1_7	15.74	D2D4_5	7.38
D1D2_5	3.29	D2D4_6	15.36
D1D2_6	9.12	D2D4_7	11.21
D1D2_7	4.00	D3D3_4	15.68
D1D3_7	9.99	D3D3_5	11.71
D2D2_4	3.24	D3D3_6	11.66
D2D2_5	7.98	D3D3_7	10.84
D2D2_6	4.74	D3D4_4	3.27
D2D2_7	9.66	D3D4_5	6.44
D2D3_4	5.87	D3D4_6	7.38
D2D3_5	9.05	D3D4_7	4.77
D2D3_6	17.05		

El esfuerzo de corte se trabaja como esfuerzo de corte adimensional, o esfuerzo de corte crítico de Shields, usando la *ecuación (2.1)*. Los valores de esfuerzo de corte crítico adimensional para cada caso se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Esfuerzo de corte crítico adimensional.

<b>Casos</b>	<b>Esfuerzo de corte crítico adimensional</b>	<b>Casos</b>	<b>Esfuerzo de corte crítico adimensional</b>
D1D1_6	0.03581	D2D3_7	0.05296
D1D1_7	0.07781	D2D4_5	0.04799
D1D2_5	0.01628	D2D4_6	0.09987
D1D2_6	0.04508	D2D4_7	0.07291
D1D2_7	0.01979	D3D3_4	0.15373
D1D3_7	0.04936	D3D3_5	0.11480
D2D2_4	0.02105	D3D3_6	0.11431
D2D2_5	0.05189	D3D3_7	0.10632
D2D2_6	0.03085	D3D4_4	0.03205
D2D2_7	0.06284	D3D4_5	0.06315
D2D3_4	0.03818	D3D4_6	0.07232
D2D3_5	0.05887	D3D4_7	0.04682
D2D3_6	0.11086		

Los experimentos con mezcla D3D3 se escapan del resto de experimentos con respecto a su esfuerzo de corte adimensional, y generan una incertidumbre elevada, por lo que se extraen del estudio final, quedando entonces, 21 casos para analizar.

Para compararlos con los esfuerzos de corte contemplando el efecto de los bolones, calculado mediante la *ecuación (3.5)*, se obtienen los valores del esfuerzo de corte que se muestran en la Tabla 4.3. Estos también se trabajan como esfuerzos de corte crítico adimensional, cuyos valores se muestran para cada caso en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.3.** Esfuerzo de corte con el efecto de los bolones incluido, medido en laboratorio (N/m<sup>2</sup>).

Casos	Esfuerzo de corte (N/m <sup>2</sup> )	Casos	Esfuerzo de corte (N/m <sup>2</sup> )
D1D1_6	23.52	D2D3_7	15.44
D1D1_7	29.16	D2D4_5	22.05
D1D2_5	15.31	D2D4_6	18.38
D1D2_6	19.85	D2D4_7	26.75
D1D2_7	17.15	D3D4_4	11.76
D1D3_7	15.44	D3D4_5	17.15
D2D2_4	11.56	D3D4_6	15.44
D2D2_5	15.68	D3D4_7	14.23
D2D2_6	21.32		
D2D2_7	17.84		
D2D3_4	10.78		
D2D3_5	16.05		
D2D3_6	17.79		

**Tabla 4.4.** Esfuerzo de corte adimensional con el efecto de los bolones incluido, medido en laboratorio.

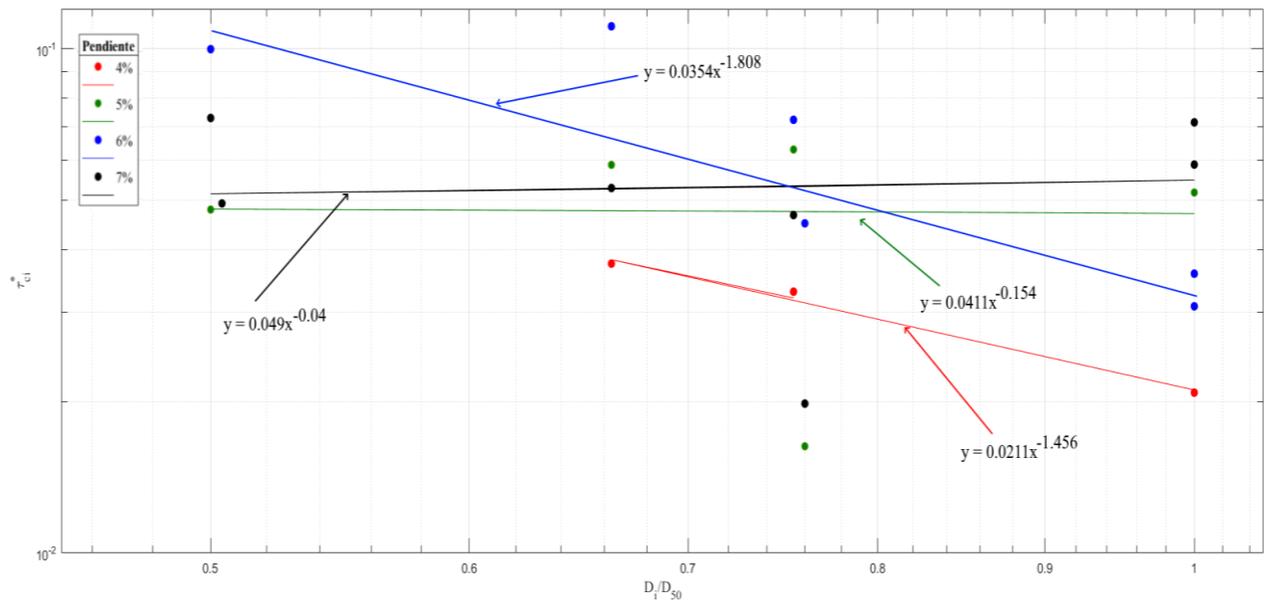
Casos	Esfuerzo de corte crítico adimensional	Casos	Esfuerzo de corte crítico adimensional
D1D1_6	0.11625	D2D3_7	0.10038
D1D1_7	0.14410	D2D4_5	0.14339
D1D2_5	0.07568	D2D4_6	0.11950
D1D2_6	0.09808	D2D4_7	0.17399
D1D2_7	0.08476	D3D4_4	0.11532
D1D3_7	0.07629	D3D4_5	0.16818
D2D2_4	0.07520	D3D4_6	0.15136
D2D2_5	0.10197	D3D4_7	0.13959
D2D2_6	0.13861		
D2D2_7	0.11599		
D2D3_4	0.07010		
D2D3_5	0.10436		
D2D3_6	0.11567		

Ya con los valores del esfuerzo de corte crítico de Shields para cada caso, se procede a separar los casos por pendiente, para analizar las distintas mezclas de granulometría, dependiendo de la misma pendiente (4, 5, 6 y 7%).

### 4.1. Gráficos por pendiente

Se representa gráficamente la relación  $D_i/D_{50}$  con el esfuerzo de corte crítico adimensional ( $\tau_{ci}^*$ ), y se ajustan los valores a una línea de tendencia potencial (forma  $a \cdot x^b$ ), pudiendo así correlacionar la constante  $a$  con  $\tau_{c50}^*$  y la constante  $b$  con  $-\gamma$ , como lo muestra la *ecuación (3.1)*. Los datos de  $\tau_{ci}^*$  y  $\gamma$ , para los casos sin bolones, fueron facilitados por Yasnuri Farrán (Farrán, 2019) en el marco de su investigación y se muestran en la Tabla 4.6, posteriormente serán comparados con los datos  $\tau_{ci}^*$  y  $\gamma$  para los casos con bolones, obtenidos en esta investigación. El esfuerzo de corte crítico adimensional para cada caso, agrupado según la pendiente longitudinal, se muestra en la Figura 4.1 para los casos con bolones obtenidos con el modelo numérico y en la Figuras 4.2 para los casos con bolones, asumiendo un flujo uniforme. Las ecuaciones que muestran  $\tau_{c50}^*$  y  $\gamma$  están indicadas en cada caso y en las Tablas 4.5 y 4.7.

#### 4.1.1. Gráfico de los casos con bolones, obtenidos con datos del modelo numérico



**Figura 4.1.**  $D_i/D_{50}$  v/s  $\tau_{ci}^*$  para pendientes de 4, 5, 6 y 7%, con datos obtenidos del modelo numérico.

4.1.2. Gráfico de los casos con bolones, asumiendo flujo uniforme

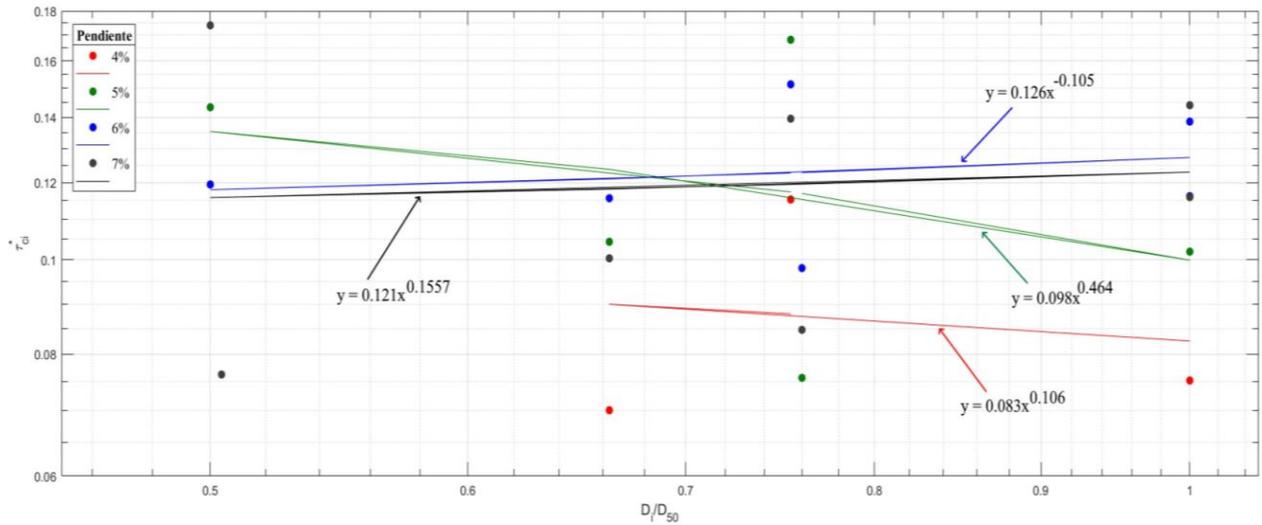


Figura 4.2.  $D_i/D_{50}$  v/s  $\tau_{ci}^*$  para pendientes de 4, 5, 6 y 7%, con datos asumiendo flujo uniforme.

Una comparación directa de las tendencias de cada pendiente se muestra para el caso con bolones (Tabla 4.5) y sin bolones (Tabla 4.6), además del caso con bolones, con el esfuerzo de corte asumiendo flujo uniforme (Tabla 4.7).

Tabla 4.5. Pendientes estudiadas y valores de  $\tau_{c50}^*$  y  $\gamma$  en escenarios con bolones.

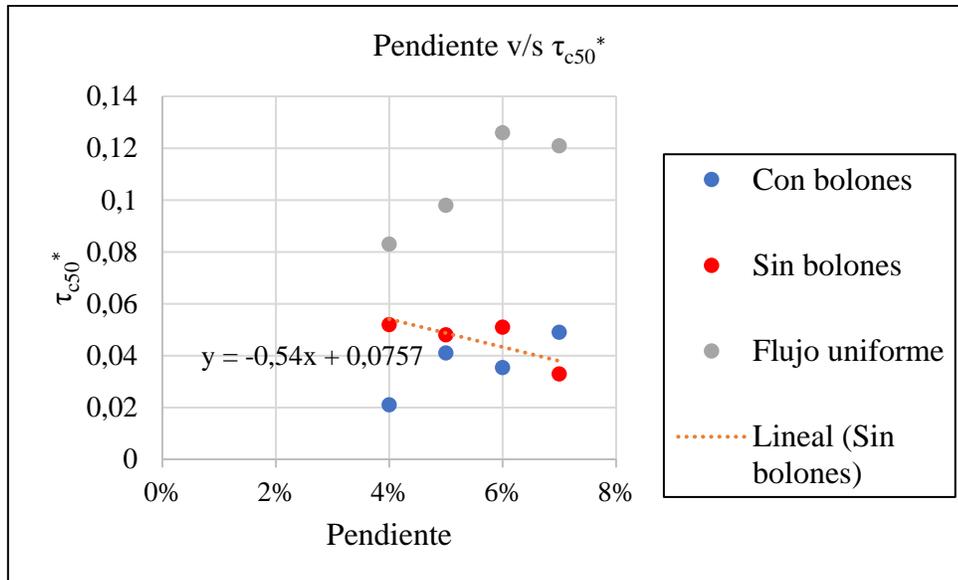
Pendiente	$\tau_{c50}^*$	$\gamma$
4%	0.0211	1.4560
5%	0.0411	0.1540
6%	0.0354	1.8080
7%	0.0490	0.0400

Tabla 4.6. Pendientes estudiadas y valores de  $\tau_{c50}^*$  y  $\gamma$  en escenarios sin bolones.

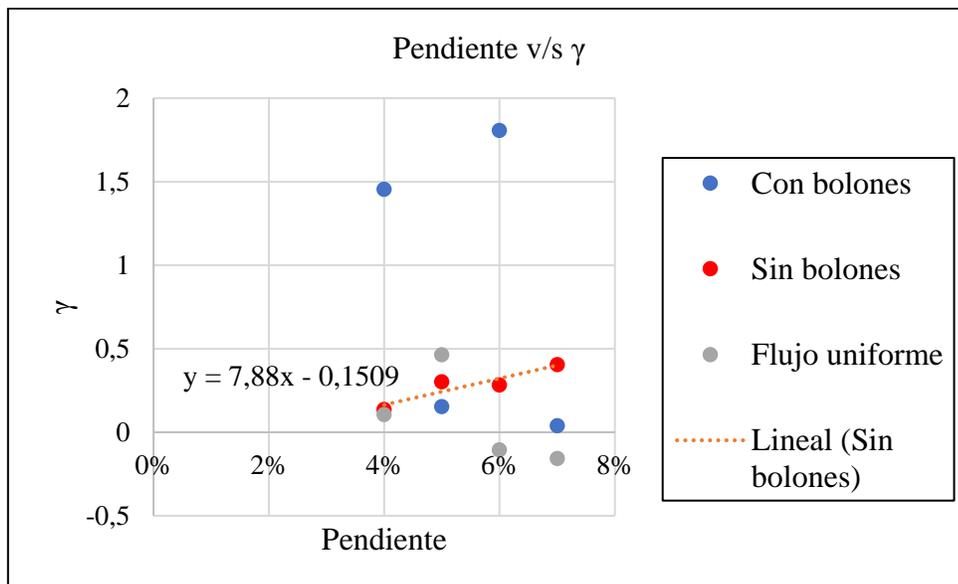
Pendiente	$\tau_{c50}^*$	$\gamma$
4%	0.052	0.137
5%	0.048	0.303
6%	0.051	0.284
7%	0.033	0.406

**Tabla 4.7.** Pendientes estudiadas y valores de  $\tau_{c50}^*$  y  $\gamma$  en escenarios con bolones, asumiendo flujo uniforme.

Pendiente	$\tau_{c50}^*$	$\gamma$
4%	0.083	0.106
5%	0.098	0.464
6%	0.126	-0.105
7%	0.121	-0.156



**Figura 4.3.** Pendiente v/s  $\tau_{c50}^*$  para los tres casos en estudio.



**Figura 4.4.** Pendiente v/s  $\gamma$  para los tres casos en estudio.

Los valores del esfuerzo de corte crítico adimensional en los escenarios con bolones son relativamente bajos comparándolos con los escenarios sin bolones. Su valor disminuye, pero en general están acorde a los típicos definidos para ríos de baja pendiente. Al separar la fracción móvil del esfuerzo de corte crítico de la fracción fija, baja el esfuerzo de corte crítico. Esto último es apreciable al comparar, dentro de los casos con bolones, los valores del esfuerzo de corte crítico separando las fracciones del sedimento con los valores contemplando el efecto de los bolones incluidos (Figura 4.3), debido a que los bolones se llevan gran parte del esfuerzo de corte, demostrando la hipótesis planteada al comienzo.

Con respecto al grado de dependencia del transporte con la razón  $D_i/D_{50}$ , para el caso sin bolones hay una cierta tendencia creciente a medida aumenta la pendiente (Figura 4.4), mientras que para los casos con bolones, no tienen una tendencia apreciable. Cuando se observan los valores de 4% y 6% se escapan del rango que se esperaba (entre 0 y 1), lo que no permite desarrollar una expresión debido a la inexistente tendencia.

Para futuros trabajos que puedan complementar esta línea de investigación, se recomienda analizar otras variables, como el efecto de la turbulencia, puesto que, en el caso de los bolones, el flujo es altamente turbulento. Debido a lo mismo, se recomienda una mejora en la medición de la profundidad para los experimentos, puesto que, al medir con regleta en el borde del canal, sólo se obtiene la profundidad en ese punto, y el flujo a lo largo de todo el canal, debido a los bolones, no está laminar o constante, por lo que la profundidad medida con las regletas no entrega una representatividad de la profundidad que está afectando en la zona de estudio. También, se recomienda medir en intervalos más pequeños de incremento de pendiente. De esta forma, las tendencias encontradas tendrán más confianza estadística que las generadas por 4 puntos (pendientes de 4 al 7% en intervalos de 1%).

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES**

## Capítulo 5. Conclusiones

Se presentó el desarrollo y aplicación de modelos numéricos de flujo, para la cuantificación del esfuerzo de corte crítico en cauces de alta pendiente en escenarios con y sin bolones.

- La modelación hidráulica con NAYS-2DH permite la obtención de esfuerzos de corte sobre la fracción móvil sin necesidad de recurrir a técnicas indirectas.
- De los 36 experimentos realizados, se tomaron en cuenta 21 para analizar.
- De los experimentos tomados en cuenta, los que tienen las pendientes más altas (6% y 7%) lograron llegar a la condición crítica con menos complicaciones técnicas que las pendientes más bajas (4% y 5%). En este caso, equivale a decir que requieren un caudal menor.
- Se compararon las estimaciones de los esfuerzos de corte obtenidos tanto en los escenarios con y sin bolones. Los valores para los escenarios con bolones, disminuyen en comparación a los sin bolones. En ambos casos se observó valores típicos de ríos de baja pendiente.
- Comparando las estimaciones de los esfuerzos de corte mediante los modelos numéricos con los obtenidos asumiendo flujo uniforme, resultan ser más bajos. Estos últimos contemplan a los bolones en el cálculo promedio del tramo, comprobando así la hipótesis planteada al comienzo del trabajo.
- No se encontró una tendencia en el grado de dependencia del transporte con la razón  $D_i/D_{50}$ , lo que no permite el desarrollo de una expresión matemática, dando hincapié a un análisis de otras variables no tomadas en cuenta en este trabajo, como la turbulencia producto de los bolones.

**Nomenclatura**

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
$\tau_{ci}^*$	Esfuerzo de corte adimensional	-
$\tau_{ci}$	Esfuerzo de corte	$N/m^2$
$\rho_s$	Densidad del sedimento	$kg/m^3$
$\rho$	Densidad del agua	$kg/m^3$
$g$	Aceleración de gravedad	$m/s^2$
$D_i$	Tamaño de grano de interés	m
$D_{50}$	Tamaño mediano de grano del sedimento	m
$\gamma$	Grado de dependencia del transporte	-
$Q$	Caudal	$m^3/s$
$f$	Frecuencia de la bomba	-
$h$	Profundidad del agua	m
$S$	Pendiente del lecho	-

## Bibliografía

- Brewster, R. Paint.NET. <https://forums.getpaint.net/>. Visitada el 7 de Septiembre de 2019.
- Buffington, J. M., Montgomery, D. R. (1997). "A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers." *Water Resour. Res.* **33**: 1993-2029.
- Chávez, P. (2016). "Análisis de la dinámica del río Ibañez en desembocadura, mediante la modelación en 2 dimensiones del flujo, transporte de sedimentos y morfodinámica del lecho." Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. (2008). "MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool." *Eurographics Italian Chapter Conference*. 129-136.
- Farrán, Y. (2019). "Determinación de esfuerzos de corte crítico para diferentes configuraciones granulométricas en cauces de alta pendiente." Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción.
- Lamb, M. P., Dietrich, W. E., Venditti, J. G. (2008). "Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?" *J. Geophys. Res.* **113**.
- Monsalve, A., Yager, E. M. (2017). "Bed surface adjustments to spatially variable flow in low relative submergence regimes." *Water Resour. Res.* **53**: 9350-9367.
- Morgan, J. A., Brogan, D. J. (2016). "How to VisualSFM." *Department of Civil & Environmental Engineering*.
- Morgan, J. A., Brogan, D. J., Nelson, P. A. (2016). "Application of Structure-from-Motion photogrammetry in laboratory flumes." *Geomorphology*. **276**: 125-143.
- Papanicolaou, A., Diplas, P., Evaggelopoulos, N., Fotopoulos, S. (2002). "Stochastic incipient motion criterion for spheres under various bed packing conditions" *J. Hydrol. Eng.* **128**: 369-380.
- MATLAB R2017a, The MathWorks, Inc. Natick, 2017.
- Wu, C. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. <http://ccwu.me/vsfm/>. Visitada el 15 de mayo de 2019.
- Yager, E. M., Dietrich, W. E., Kirchner, J. W., McArdeell, B. W. (2012). "Prediction of sediment transport in step-pool channels." *Water Resour. Res.* **48**.