



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE E
INFILTRACIÓN DE CONCENTRADO DE COBRE SOBRE UN LECHO
MIXTO DE GRAVAS Y ARENAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CAMILO ALBERTO TAPIA CARRASCO

PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
CHRISTIAN IHLE BASCUÑAN

Esta memoria cuenta con el financiamiento del Proyecto Fondecyt 1140767

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: CAMILO ALBERTO TAPIA CARRASCO
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: Sr. YARKO NIÑO CAMPOS**

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE E INFILTRACIÓN
DE CONCENTRADO DE COBRE SOBRE UN LECHO MIXTO DE
GRAVAS Y ARENAS**

En Chile la extracción, refinación y venta de cobre es una de las principales actividades económicas del país y su industria está localizada principalmente en toda la zona centro-norte del país. Además, las grandes faenas suelen ubicarse en territorios cercanos a la cordillera y estas deben llevar su producción a los puertos para ser exportados, por lo que una forma usual de transporte del cobre, es en su fase líquida, como concentrado de cobre, a través de concentraductos, que pueden extenderse por cientos de kilómetros. Estos concentraductos a menudo presentan fugas que producen la contaminación de suelos y cauces. Si los derrames ocurren en cauces, son situaciones graves ya que extienden rápidamente la contaminación hacia canales de sistemas de regadío, captaciones de agua potable y turbinas generadoras de hidroelectricidad. Por otro lado parte del derrame se deposita en lechos de ríos, que luego de crecidas de periodos de deshielo o grandes tormentas, pueden resuspender y movilizar el concentrado de cobre depositado en algún derrame previo.

El trabajo consiste en estudiar la simulación de un derrame de concentrado de cobre en un río de montaña, en cuanto al transporte, depositación y estratigrafía del lecho. Para esto se cuenta con un canal el cual es implementado con un lecho de grava, instrumentos de medición de la velocidad del flujo, cámaras y estanque dosificador para el concentrado de cobre, entre otros. El objetivo es poder cuantificar la evolución de la estratigrafía del lecho de grava debido al transporte y/o depositación de concentrado de cobre.

Para esto se cuantifica los fenómenos de transporte hidráulico de sólidos presentes en el problema, adaptando el canal del laboratorio Francisco Javier Domínguez con un lecho mixto de grava y arena, e implementando instrumentos de medición de velocidad (Particule Image Velocimetry PIV) para así estimar esfuerzos de corte actuando en el lecho, y poder relacionarlo con la suspensión e infiltración del concentrado de cobre derramado.

Como resultado se obtiene que la forma dominante de transporte (a lo largo del canal utilizado) de concentrado de cobre es mediante la suspensión (63%) debido a su granulometría fina ($D_{50} = 22.4\mu m$). Los fenómenos advectivos y turbulentos no permiten la depositación total del concentrado que viaja en suspensión a pesar de su alto peso específico ($4,2 ton/m^3$), el mayor porcentaje de concentrado de cobre que sedimenta en el lecho lo hace muy cerca de la zona de derrame por lo que el momentum del derrame es importante ya que incide en los porcentajes suspensión/depositación. Toda partícula de concentrado de cobre que logre llegar al lecho no logrará un transporte por arrastre ni saltación y la única forma de que este se movilice con el flujo, es debido a socavaciones de lecho. Finalmente la infiltración del concentrado de cobre está afectada, por lo caudales que escurren y por la granulometría presente en el lecho obteniendo relaciones en las cuales mayores caudales implican mayores infiltraciones, mientras que granulometrías más gruesas permiten mayor infiltración del concentrado de cobre en el lecho.

... A mis padres y hermanas

Agradecimientos

A mis padres por dedicarme su vida, y obligarme a superar mis límites cada día.

A mi padre Milton por mostrarme el camino de la independencia y autonomía desde temprana edad. Admiro mucho tu historia y sacrificio puesto en mí y mis hermanas

A mi madre Ana por mostrarme que la constancia y la dedicación siempre terminan mostrando frutos, sin importar cuanto se demore. Has dado hasta lo que no tienes por mí y mis hermanas bajo todas las condiciones que se han presentado, te quiero mucho.

A mis hermanas Catherine, Valeria y Abril por su amor y compañía.

A mi abuela Inés por su cariño demente a su nieto favorito.

A mi abuela Tita que donde sea que esté, siempre está cuidándome la espalda en todas las situaciones límites en las que me involucro.

A mi querida Pamela por aguantar al ser humano más disperso que le pudo tocar por amigo.

A mi técnico de karate Cesar Tolorza y el equipo de karate de la Jiyukan Peñalolén, que me han recibido todos estos años con los brazos abiertos y que permanentemente me sacan de la zona de confort, para pasar al siguiente nivel.

Al montañismo representado a través de mis cordadas y ex cordadas (Christian-Ricardo, Ramiro , Robin Piron), tanto en la roca como en el hielo han desarrollado infinitamente mi nivel humano y me han permitido acceder a lugares que pocos humanos han logrado disfrutar con sus propios sentidos.

A mis amigos de la universidad y liceo Aldo, Sebastián, Benjamín, Miguel Ángel, Mario, Kevin, Daniel y Matías.

Y a todas las personas que en algún momento tuvieron que soportar muy de cerca mi absurdo ritmo de vida, en especial a la Cami que me aguantó en mi primer año.

A la querida gente de Coyhaique y la Región de Aysén por recibirme siempre con su calor e historias.

Un especial agradecimiento para Natalia Bustamante, sin ella, todo esto hubiese sido imposible, nunca olvidaré el apoyo técnico y moral que recibí de tu parte.

A los profes del lab, Don Juan, Don Manuel y Giovanni, al querido Ariel, que apoyaron no solo con la parte técnica sino que siempre estaban ahí para compartir una buena conversación.

Y muchas gracias al profesor Yarko Niño por la paciencia y confianza puesta en mí, y al profesor Tamburrino por su paciencia infinita de leer el primer borrador de este trabajo.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Metodología	2
1.4	Organización del informe	3
2.	Base teórica del problema	5
2.1	Números Adimensionales	5
2.1.1	Esfuerzo de corte de Shields.....	5
2.1.2	Densidad relativa sumergida del sedimento	5
2.1.3	Numero de Froude	5
2.1.4	Numero de Reynolds	6
2.1.5	Numero de Reynolds de la partícula.....	6
2.2	Mecánica de fluidos	6
2.3	Modelos de transporte en flujos turbulentos.....	7
2.4	Perfil de velocidades	8
2.5	Esfuerzo de corte total (Nikora et. al 2001).....	9
2.6	Distribución de velocidad	10
2.7	Esfuerzo de corte crítico para el trasporte de sedimento cohesivo	11
2.8	Gasto sólido de fondo	14
2.9	Experimentación descriptiva de infiltración de finos.	16
3	Instalación experimental	21
3.1	Descripción general	21
3.2	Canal	22
3.3	Sedimentos del lecho	23
3.4	Concentrado de cobre (sedimento fino).....	24
3.5	Dispensador de concentrado de cobre	24
3.6	Placa anti-socavación.....	26
3.7	Tubo de Venturi	26
3.8	Sistema de estanques	27
3.9	Recirculación	27
3.10	Estación de tamizado	28

3.11	PIV	28
4	Metodología experimental.....	30
4.1	Montaje de experiencia	30
4.1.1	Pendiente del canal	30
4.1.2	Instalación de lechos.....	30
4.1.3	Concentrado de cobre	30
4.1.4	Sistema de cámaras e iluminación.....	31
4.1.5	Caudal.....	31
4.1.6	Altura Vertedero	31
4.2	Procedimiento experimental	31
4.2.1	Procedimiento PIV	32
4.2.2	Vertimiento del concentrado de cobre.....	33
4.3	Desmontaje de experiencia	34
4.3.1	Concentrado de cobre de fondo.....	34
4.3.2	Concentrado de cobre de suspensión.....	34
4.4	Procesamiento de resultados	35
4.4.1	Procesamiento de datos	35
4.4.2	PIV.....	36
4.4.3	Concentrado de cobre	36
5	Resultados	37
5.1	Resumen de experimentos	37
5.1.1	Experimento 1 arena 8.....	37
5.1.2	Experimento 2, arena 7.....	40
5.1.3	Experimento 3, arena 6.....	40
5.1.4	Experimento 4, arena 5.....	41
5.1.5	Experimento 5, 6 y 7	41
5.2	Infiltración y variación de la granulometría de arenas.....	42
5.3	Infiltración y variación de caudales	45
5.3.1	Arena 7	45
5.4	Relaciones tipo Gibson para infiltración del concentrado de cobre	51
5.5	Perfiles de velocidad	52
5.6	Esfuerzos de corte PIV	53
5.7	Comparación esfuerzo de corte PIV y logarítmico.....	56
5.8	Trasporte de concentrado de cobre	57
5.9	Granulometrías de concentrado de cobre.....	60

6	Discusiones y conclusiones	64
6.1	Instalación experimental	64
6.2	Metodología	64
6.3	Resultados	65
7	Bibliografía.....	66
8	Anexos.....	69
A.1.	Deducción de ecuación para diseño de dosificador de concentrado de cobre	69
A.2.	Curvas granulométricas del lecho	71
A.3.	Curvas de bomba implementada en canal.....	72
A.4.	Propagación de errores tubo Venturi	73
A.5.	Esfuerzo de corte logarítmico	75
A.6.	Granulometría concentrado de cobre	77

Tablas

Tabla 3.1:	Características del canal	23
Tabla 3.2:	Identificación de arenas usadas en los experimentos	24
Tabla 4.1:	Instrumentación de filmaciones.....	31
Tabla 5.1:	Parámetros hidráulicos de los experimentos	41
Tabla 5.2:	Parámetros estadísticos de infiltración.....	42
Tabla 5.3:	Infiltración experiencia 5, arena 7, caudal 1,82 l/s.....	49
Tabla 5.4:	Infiltración experiencia 7, arena 7, caudal 2,45 l/s.....	49
Tabla 5.5:	Caracterización del adimensional de infiltración para el concentrado de cobre sobre estratos de arena.....	52
Tabla 5.6:	Resumen de peso (gr) de concentrado de cobre en fondo de canal por cada tramo.....	58
Tabla 5.7:	Distribución de concentrado de cobre en cuanto a sedimentación y suspensión.....	60
Tabla 5.8:	Resumen de diámetros característicos de concentrado de cobre en suspensión y fondo.....	62
Tabla 5.9:	Diámetros característicos de finos depositados en lechos.....	63
Tabla 8.1:	Resumen material granular [mm].....	71
Tabla 8.2:	Errores característicos de tubo Venturi:	73
Tabla 8.3:	Calibración tubo Venturi y sus errores.....	74
Tabla 8.4:	Resultados granulometro laser para el análisis de Concentrado de Cobre....	77
Tabla 8.5:	Diámetros característicos de concentrado de cobre (interpolaciones lineales)	78

Figuras

Figura 2.1: Esquema de los perfiles de velocidad (Nikora et. al 2001).....	9
Figura 2.2: Equilibrio de fuerzas sobre partículas cohesivas (Taki, 2001)	12
Figura 2.3: Variación del esfuerzo de corte critico adimensional y la viscosidad cinemática de pulpas (Taki, 2001).....	14
Figura 2.4: Relaciones adimensionales para el gasto sólido de fondo. MPM denota Meyer-Peter y Muller, EF denota Engenlund y Fredsoe, AM denota Ashida y Michiue y FLVB denota Fernandez-Luque y van Beek.	16
Figura 2.5: Esquema de los fenómenos de infiltración sin impedimentos y formación de puentes	17
Figura 2.6: Detalle geométrico y esquemático de la formación de puentes	17
Figura 2.7: a) Contenido de arena y b) D50 del fino depositado, por tramo en seis posiciones diferentes de la pluma para el experimento 1 de Gibson et al. (2009)	20
Figura 3.1: Esquema de instalación experimental	22
Figura 3.2: Dispensador de concentrado de Cobre.....	25
Figura 3.3: Placa antisocavación	26
Figura 3.4: Calibración de caudales	26
Figura 3.5: Sistema de estanques.....	27
Figura 3.6: Estación de tamizado.	28
Figura 5.1 a) Lecho previo al derrame de concentrado de cobre; b) Concentrado de cobre en suspensión; c) Inicio de infiltración; d)fin de infiltración.	38
Figura 5.2: Transporte de arenas	38
Figura 5.3: a) Aumento de Caudal 1; b) Aumento de caudal	39
Figura 5.4: a) Compuerta acrílico 1; b) Compuerta acrílico 2; c) Compuerta acrílico 3; d) Compuerta acrílico 4.	39
Figura 5.5: Estado final de la infiltración. Experiencia con compuerta	40
Figura 5.6: Infiltración de concentrado de cobre según cambios en la granulometría... 43	43
Figura 5.7: Diagrama de caja para variaciones de granulometría	44
Figura 5.8: Infiltración tramo 3ª arena 7.....	46
Figura 5.9: Infiltración tramo 3b arena 7.....	46
Figura 5.10: Infiltración tramo 4 arena 7.....	47
Figura 5.11: Infiltración tramo 5 arena 7.....	48
Figura 5.12: Infiltración tramo 6 arena 7.....	48
Figura 5.13: Diagrama de caja canal completo para caudal 2,45 l/s	50
Figura 5.14: Diagrama de caja canal completo para caudal bajo 1,82 l/s	51
Figura 5.15: Perfil de velocidad para caudales 1,82 l/s y 2,45 l/s antes y después del derrame de concentrado de cobre.	53
Figura 5.16: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 1,82 l/s.....	54
Figura 5.17: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 2,45 l/s.....	55
Figura 5.18: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 1,82 l/s en costado de canal.....	56
Figura 5.19: Comparación entre $\tau_{tur} *$ proveniente del PIV y $\tau_{log} *$ proveniente de la formula logarítmica.	57
Figura 5.20: transporte concentrado de cobre debido a depositación de la suspensión . 59	59

Figura 5.21: Comparación granulométrica de suspensiones y fondos de concentrado de cobre	61
Figura 5.22: Curvas granulométricas de concentrado de cobre infiltrados en cada tramo del canal.....	62
Figura 5.23: Tendencia de distribución de concentrado de cobre respecto a diámetros característicos de finos depositados en el lecho.	63
Figura 8.1: Curvas granulométricas arenas usadas en lecho	71
Figura 8.2: Curva de bomba Ebara Pumps 3M 50-125/3, Fuente: web del fabricante ..	72
Figura 8.3: Esfuerzo logarítmico para caudal de 1,82 lt/seg	75
Figura 8.4: Esfuerzo logarítmico para caudal de 2,45 lt/se	76
Figura 8.5: Curva Granulométrica de Concentrado de Cobre	77

1. Introducción

1.1 Motivación

Una de las actividades económicas más importantes del país es la extracción, refinación y venta de cobre. Esta actividad se desarrolla a variadas escalas productivas a lo largo del país, principalmente desde la 6ta Región del Libertador Bernardo O'Higgins hacia el norte.

El proceso productivo depende del origen del mineral pudiendo ser este oxidado o sulfurado. Si el mineral se encuentra sulfurado, entonces el proceso de refinación inicia con un chancado y molienda, para reducir el diámetro de las partículas y así dejar a exposición la porción de cobre. Luego estas partículas de cobre sulfurado son hidrofobizadas y depositadas en estanques llamados celdas de flotación, en donde burbujas de aire inyectadas en la parte baja del estanque colectan las partículas hidrofóbicas de cobre, rebalsando del estanque y siendo colectadas para su posterior secado y tratado en fundición. Es en esta parte del proceso, la recolección de burbujas, es donde se origina el concentrado de cobre, sustancia con un alto peso específico, que en muchas ocasiones ha sido derramada a cauces cercanos a las faenas. El ejemplo más reciente de esta situación fue el 25 de febrero del 2016, donde en el sector de Saladillo, en Río Blanco, Los Andes, Región de Valparaíso, una tubería que transportaba concentrado de cobre sufrió una rotura derramando al menos $50 m^3$ de concentrado de cobre al río Blanco¹ afluente del río Aconcagua, el cual abastece de agua a diversas localidades para usos bajo las normas chilenas Nch 409 de agua potable y Nch 1.333 de regadío para la agricultura. Además, las aguas de este río son captadas para diversas centrales hidroeléctricas de paso. Por esto, conocer la hidrodinámica del transporte del concentrado de cobre es esencial para iniciar un estudio de impacto ambiental y social asociados a este tipo accidentes mineros.

Estudios anteriores (Macklin et al. 2006, Bird et al. 2010) han detectado la gran importancia que tienen derrames de metales en el medio ambiente, en especial en zonas de inundación por crecidas, que transportan contaminantes (metales pesados) fuera de sus lechos regulares, exponiendo a mayor cantidad de organismos a la interacción con estos contaminantes. Además estos derrames usualmente impiden el intercambio hiporreico, característico de los ríos de montaña debido a lechos con una granulometría gruesa mal seleccionada que permite entre sus sedimentos la vida de gran cantidad de organismos que habitan ríos (Dennis et al. 2009).

Este trabajo de título se centrará en estudiar experimentalmente la dinámica del transporte y depositación de concentrado de cobre y la dinámica de la estratigrafía de un lecho de grava con concentrado de cobre, simulando un río de montaña a través de un canal con lecho de grava. Esto permitirá en el futuro cuantificar la zona afectada por un derrame real.

¹ Moreno, G. Rotura de cañería en faenas de Codelco genera derrame de mineral en río de Los Andes. El Mercurio. www.emol.com, 2016

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudio experimental de la interacción de un derrame de concentrado de cobre con un canal de lecho de grava que simule un río de montaña.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modificar un canal del laboratorio Francisco Javier Domínguez, para implementar un derrame de concentrado de cobre en un lecho de grava.
- Experimentar con un canal abierto y lecho de grava, i) un flujo con un derrame de concentrado de cobre, ii) un flujo de agua removiendo el concentrado, y iii) la estratigrafía del concentrado de cobre en el lecho.
- Estudiar el transporte del concentrado de cobre en función del caudal y de la estratigrafía del sedimento y del concentrado de cobre.
- Analizar los resultados de la experimentación buscando relaciones para el transporte e infiltración de concentrado de Cobre.

1.3 Metodología

- Definición de parámetros y sus relaciones durante la experimentación.

Durante esta etapa se definen las variables que influyen en los fenómenos de transporte y depositación de concentrado de cobre en un lecho de grava, para implementar sistemas de medición directos de algunos, tales como, velocidades de flujo o caudales, y otros deducibles tales como perfiles de velocidad, esfuerzos de corte y gasto sólido de fondo.

- Modificación, construcción y puesta en marcha del canal.

Entender el transporte y depositación de un derrame de concentrado de cobre en un río de montaña, involucra la medición de variables que son extremadamente difíciles de medir en terreno. Por lo que mediante un modelo reducido, se replica el fenómeno de manera controlada, tal que, sea posible el registro de las variables involucradas. La puesta en marcha del canal involucra:

Diseño conceptual de las modificaciones que se implementan en el canal, para estudiar los fenómenos de transporte y depositación de concentrado de cobre en un lecho de grava y arena.

Implementación de dos capas de grava para simular lecho de río.

Estudio granulométrico del concentrado de cobre.

Diseño hidráulico del dispensador que inyecta concentrado de cobre al canal.

Puesta en marcha del canal, verificando una correcta operación mecánica del experimento.

Instalación de instrumentos para la medición del caudal, avance de concentrado de cobre e infiltración de concentrado de cobre, tales como, cámara de alta velocidad, partículas de rodamina, láser, cámaras fotográficas, estanques de recolección de concentrado de cobre al final del canal, dispensador de concentrado de cobre.

- **Desarrollo de experimentos**

Se implementó una metodología para la manipulación de los instrumentos de medición y un registro sistemático de resultados, además se implementó una metodología para el procesamiento de los datos registrados y su posterior análisis.

- **Análisis de resultados**

Mediante la metodología implementada se recolectó fotografías y videos que fueron procesados a través del software Matlab para la extracción de datos de infiltración. Por otro lado mediante diferencia de masas se establecieron porcentajes de infiltración y de transporte en suspensión. Estos datos fueron organizados y presentados en gráficos para analizar tendencias en comportamiento del concentrado en cuanto a su granulometría, forma de transporte y niveles de infiltración.

1.4 Organización del informe

El trabajo se divide en 6 capítulos más bibliografía y anexos y se presentan en el siguiente orden

Capítulo 1 Introducción: Se describe la motivación del trabajo y el contexto en el que nace la problemática, se justifica la importancia el problema identificado y se presentan los objetivos del estudio. Se presentan brevemente las metodologías e instrumentación implementadas en el estudio.

Capítulo 2 Base teórica del problema: En este capítulo se presentan las teorías involucradas en el transporte e infiltración del concentrado de cobre, que están relacionados con mecánica de fluidos, caracterización de la lámina de agua y turbulencia. se exponen teorías del comportamiento de sedimentos cohesivos, dado que se está trabajando con concentrado de cobre. También se da un resumen de los fenómenos que caracterizan la infiltración de sedimentos finos entre sedimentos gruesos.

Capítulo 3 Instalación Experimental: Se describe todo el equipamiento usado en la experimentación tales como instrumentos de medición instalación experimental y accesorios anexos a la estructura principal del experimento.

Se describe los componentes principales del montaje experimental y procedimiento utilizado durante el desarrollo de la calibración del tubo Venturi como medidor de caudal, implementación del sistema de visualización óptica Particle Image Velocimetry (PIV) y uso del programa PivLab como sistema de procesamiento de imágenes, calibración y registro fotográfico y granulometría del lecho móvil de la sección de estudio.

Capítulo 4 Metodología Experimental: En este capítulo se resume el procedimiento ejecutado en todas las etapas de experimentación, estas son: el montaje de la experiencia, la experimentación previa y posterior al derrame de concentrado de cobre, el desmontaje de la experiencia, la implementación del PIV y el análisis de los datos obtenidos.

Capítulo 5 Resultados: Se presentan los resultados de cada experimento en cuanto a sus condiciones hidráulicas y cualitativas; Cuantitativamente se presentan los niveles de infiltración de concentrado de cobre en lecho mixto, esfuerzos de corte obtenidos desde los datos generados con la técnica PIV y distintas relaciones de transporte e infiltración de concentrado de cobre de acuerdo a la granulometría y la distancia al origen del derrame

Capítulo 6 Discusiones y conclusiones: En este capítulo se presentan todos los problemas y sugerencias sobre la instalación experimental y metodología luego de haber visto los resultados; Por otro lado se dan conclusiones de los fenómenos de infiltración y su relación con la granulometría del lecho y la variación de caudales.

2. Base teórica del problema

2.1 Números Adimensionales

2.1.1 Esfuerzo de corte de Shields

Corresponde a la adimensionalización del esfuerzo de corte de fondo τ_0

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\rho g R D_s} \quad (2.1)$$

D_s : Diámetro característico del sedimento transportado

ρ : Densidad fluido

R : Densidad relativa sumergida del sedimento

g : Aceleración de gravedad

2.1.2 Densidad relativa sumergida del sedimento

Relación entre densidad de sedimento (ρ_s) y fluido (ρ):

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.2)$$

2.1.3 Numero de Froude

El Número de Froude da cuenta de la interacción entre fuerzas inerciales y gravitatorias mediante la expresión:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (2.3)$$

Donde:

U : Velocidad media del flujo

g : Aceleración de gravedad

h : Altura del flujo

En canales abiertos el Froude da cuenta del tipo de escurrimiento que se tiene, lo cual es importante para conocer de qué manera se transmite la información debido a cambios momentáneos de altura generados por las ondas de presión.

De esta manera se define:

$F_r < 1$ Escurrimiento subcrítico o de río

$F_r > 1$ Escurrimiento supercrítico o de torrente

$F_r = 1$ Esguerrimiento crítico

2.1.4 *Numero de Reynolds*

$$R_e = \frac{UR_h}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde:

U: Velocidad media del flujo

R_h : Radio hidráulico

ν : Viscosidad cinemática

Este adimensional permite diferenciar cuando un flujo es turbulento, laminar o se encuentra en una transición laminar-turbulento. La expresión mostrada corresponde a la usada en canales primaticos. Esto permite definir las ecuaciones que se usarán en el problema.

Los siguientes valores definen el régimen en que se encuentra el flujo:

$$\begin{array}{ll} R_e < 500 & \text{Régimen Laminar} \\ 500 < R_e < 1.000 & \text{Régimen de transición} \\ R_e > 1.000 & \text{Régimen turbulento} \end{array}$$

2.1.5 *Numero de Reynolds de la partícula*

$$R_{ep} = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2.5)$$

$u_* = \sqrt{gR_h i}$: Velocidad de corte para flujo uniforme

i: Pendiente del lecho

d_s : Diámetro característico del sedimento

ν : Viscosidad cinemática

2.2 *Mecánica de fluidos*

En primer lugar para describir la hidrodinámica de un fluido newtoniano e incompresible, es necesario el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes, usando la notación de Einstein se tiene:

$$\frac{du_i}{dt} + u_j \frac{du_j}{dx_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_j} + \nu \frac{d^2 u_i}{d^2 x_j} \quad (2.7)$$

Donde

$x_{i,j,k}$: Conjunto de coordenadas cartesianas

$u_{i,j,k}$: Velocidades en cada coordenada

g_i : Aceleración de gravedad del campo de fuerzas másicas

ρ : Densidad del fluido

p : Presión

ν : Viscosidad cinemática

Para un fluido ideal e incomprensible los valores de ρ y ν son constantes

2.3 Modelos de transporte en flujos turbulentos.

Existen diversos modelos conceptuales para calcular el problema de transporte en flujos turbulentos, los que requieren conocer primero las propiedades del flujo turbulento, para posteriormente resolver el problema del transporte.

Existen tres clases de enfoques: modelos DNS, modelos LES y modelos RANS

Detallando los modelos RANS corresponde a las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas temporalmente; Esto es por ejemplo, una variable $V = \bar{V} + V'$, donde \bar{V} es un promedio temporal, y V' una fluctuación temporal.

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} + \bar{u}_i \frac{d\bar{u}_j}{dx_i} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx_j} + \frac{d\overline{u'_i u'_j}}{dx_j} + \nu \frac{d^2 \bar{u}_i}{dx_j^2} \quad (2.8)$$

Siendo el tensor de esfuerzo de corte:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.9)$$

Donde el primer término es el esfuerzo de corte viscoso y el segundo es el esfuerzo de corte turbulento aparente.

Las propiedades turbulentas en flujos de canales abiertos han sido ampliamente estudiadas y es bien entendida para flujos en paredes lisas (Nezu y Nakagawa 1993) a través de modelos RANS, que consideran un promedio temporal de las variables involucradas en la ecuación de Navier-Stokes. Sin embargo para superficies con rugosidades varios supuestos sobre los cuales trabajan los modelos RANS quedan invalidados tales como:

- 1- Seguir considerando válidos los promedios temporales en zonas donde el lecho es muy irregular.
- 2- Al cambiar la superficie del flujo por cada plano xy (plano paralelo al lecho), se ha recurrido a promedio espaciales, los cuales generan parámetros que no siempre se pueden relacionar con las propiedades locales del flujo, dadas por las RANS

(se recurre a promedios espaciales porque para cada plano xy, el área por la que escurre el flujo va cambiando)

En la mayoría de los estudios estas contradicciones conceptuales han sido ignoradas y a lo más se ha dado cuenta del efecto mediante la introducción de un término extra en las RANS.

Los primeros autores en considerar un promedio espacial para la descripción de flujos fueron Smith Y McLean (1977) quienes introdujeron la idea, mientras que Wilson y Shaw (1977), desarrollaron una metodología para describir flujos atmosféricos en follajes de árboles.

La forma de promediar variables de los flujos para planos xy a una altura z es la siguiente:

$$\langle \bar{V} \rangle (x, y, z, t) = \frac{1}{A_f} \iint_{A_f} V(x', y', z, t) dx' dy' \quad (2.10)$$

Nikora et al. (2001) definieron A_f como el área efectiva de escurrimiento del fluido y al llegar al lecho, va cambiando, por cada z, desde un $A_f = A_{total}$ justo sobre la rugosidad más alta hasta llegar a un $A_f = 0$ en medio del lecho

Giménez Curto et al. (1996) usaron el concepto de A_f/A_{total} para aplicarlo en las ecuaciones de Reynolds temporalmente promediadas, para promediarlas espacialmente. Esto es:

Para $Z > Z_c$

$$\frac{d\langle \bar{u}_i \rangle}{dt} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{d\langle \bar{u}_j \rangle}{dx_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{d\langle \bar{p} \rangle}{dx_i} - \frac{d\langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle}{dx_j} - \frac{d\langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle}{dx_j} + \nu \frac{d^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{d^2 x_j} \quad (2.11)$$

Para $Z < Z_c$

$$\begin{aligned} \frac{d\langle \bar{u}_i \rangle}{dt} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{d\langle \bar{u}_j \rangle}{dx_j} = & g_i - \frac{1}{\rho} \frac{d\langle \bar{p} \rangle}{dx_i} - \frac{1}{A(z)} \frac{dA(z) \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle}{dx_j} - \\ & - \frac{1}{A(z)} \frac{dA(z) \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle}{dx_j} + \nu \frac{d^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{d^2 x_j} + \nu \frac{d^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{d^2 x_j} - \frac{1}{\rho} \langle \frac{d\bar{p}}{dx_j} \rangle \end{aligned} \quad (2.12)$$

Z_c : altura de la rugosidad más alta.

$$\tilde{V} = \bar{V} - \langle \bar{V} \rangle$$

2.4 Perfil de velocidades

Según Nikora et al. (2001) en la lámina de agua que escurre por un canal, se puede identificar varias subcapas características, todas influenciadas por su distancia a las rugosidades del lecho.

Subdivisión del flujo en capas específicas (Nikora et. al 2001):

Capa externa: En esta zona los esfuerzos viscosos y los flujos inducidos por la forma del lecho, son despreciables, además las ecuaciones promediadas en el tiempo y espacio

son equivalentes a las solo promediadas en el tiempo. Las escalas características de esta zona incluyen la velocidad de corte, la velocidad máxima, la altura del flujo.

Capa logarítmica: En esta zona los esfuerzos viscosos y los flujos inducidos por la forma del lecho, son despreciables; además las ecuaciones promediadas en el tiempo y espacio son equivalentes a las solo promediadas en el tiempo. Sin embargo la topografía del lecho podría alterar algunas velocidades de esta capa. Las escalas características de esta capa son la velocidad de corte y la altura del flujo.

El modelo de distribución de la velocidad media se ajusta al perfil logarítmico.

Capa inducida por la forma del lecho: En esta capa cobran importancia los flujos inducidos por la forma del lecho debiendo usar las ecuaciones de Reynolds promediadas para el espacio y el tiempo, en esta zona A_f no depende de z y se caracteriza porque la rugosidad afecta el flujo de esta capa en un espesor posible entre 1 a 4 veces el tamaño de la rugosidad

Capa de interfase: en esta zona A_f depende de z y el cuociente A_f/A_{total} , toma valores desde 1 hasta 0 si se trata de un lecho impermeable o desde 1 a $\text{Mín}(\frac{A_f}{A_{total}})$ en caso de ser un lecho granular.

Capa subsuperficial: el flujo en esta zona es a través de los poros formados entre los granos del lecho, y está influenciado por fuerzas gravitatorias y de los flujos de las capas superiores. Esta capa se puede caracterizar a través de la velocidad de corte y la longitud característica de los poros.

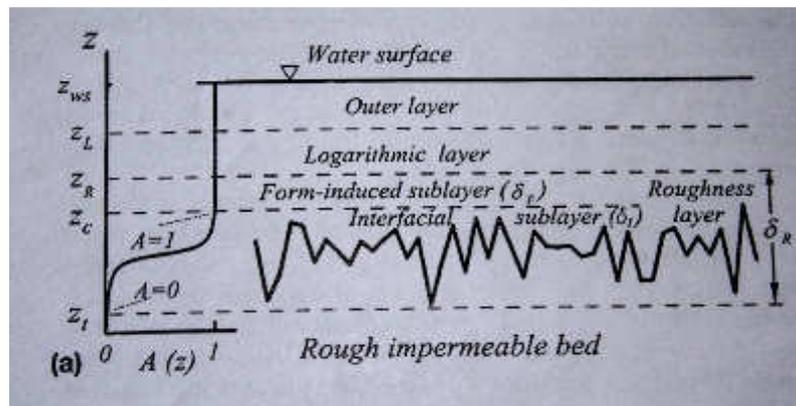


Figura 2.1: Esquema de los perfiles de velocidad (Nikora et. al 2001)

2.5 Esfuerzo de corte total (Nikora et. al 2001)

Considerando un flujo permanente, uniforme, espacialmente promediado en la rugosidad del lecho, y con superficie libre plana

En la región sobre la rugosidad del lecho se tiene la siguiente relación:

$$gS_b - \frac{d\langle u'w' \rangle}{dz} - \frac{d\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle}{dz} = 0 \quad (2.13)$$

donde $S_b \approx \sin \alpha$ es la pendiente promedio del lecho.

Finalmente de la integración de esta ecuación en las diferentes subcapas detalladas para la distribución de la velocidad se tiene diferentes expresiones de las cuales solo importa la que está asociada a la subcapa “Capa inducida por la forma del lecho” quedando la siguiente expresión para el esfuerzo de corte.

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = gS_b[z_{ws} - z] = [-\langle \overline{u'w'} \rangle (z) - \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle (z)] \quad (2.14)$$

z_{ws} : *Altura del flujo*

Que es la ecuación desde la cual se podría obtener el esfuerzo de corte al cual están afectos los sedimentos en la subcapa de interés a través de la medición de velocidades y sus fluctuaciones turbulentas.

Por otro lado el esfuerzo de corte medio se define como:

$$\tau = \rho g R_h i \quad (2.15)$$

Donde:

ρ : *densidad del fluido*

g : *Aceleración de gravedad*

R_h : *Radio hidraulico*

i : *Pendiente de lecho*

Este valor es solo referencial y se usa para saber si los esfuerzos calculados a lo largo de vertical se ajustan a los valores medio del esfuerzo de corte.

Además de la expresión 2.15 también suele usarse una componente más para describir esfuerzo de corte debido a la viscosidad del fluido que corresponde al esfuerzo de corte laminar que está dado por la expresión

$$\tau_{lam} = \mu \frac{d(\bar{u})}{dz} \quad (2.16)$$

Sin embargo, su valor es distinto de cero dentro de la capa viscosa cuando el lecho es liso, en estas experimentación, no se cumplen esas condiciones por lo que no se usarán valores asociadas a esta componente.

2.6 Distribución de velocidad

Suponiendo que el flujo tiene una altura mucho mayor a la de la rugosidad. La distribución de velocidades en la capa externa no se detallara ya que es aproximadamente igual que para flujos con lechos lisos. Por lo usando la reformulación de Izakson (1937), para la subcapa logarítmica, la siguiente expresión.

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle (Z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{Z}{\delta_R} \right] + \frac{\langle \bar{u} \rangle \delta_R}{u_*} \quad (2.17)$$

donde

$$Z = z - z_t$$

z_t = Nivel de referencia del flujo respecto al lecho ($A = 0$)

$\kappa = 0.41$ constante de Von Karmann

\bar{u} = velocidad media temporal

$\langle \bar{u} \rangle$ = velocidad media espacial

$$\delta_R = z_r - z_t$$

z_r = Altura de subcapa influenciada por las formas de fondo

2.7 Esfuerzo de corte crítico para el transporte de sedimento cohesivo

Para trabajar con concentrado de cobre es necesario estudiar el comportamiento de sedimentos cohesivos, donde las interacciones electroquímicas entre los grano toman importancia, Taki (2001), en su estudio de sedimentos cohesivos establece algunas relaciones de humedad de sedimento donde la interacción electroquímica deja de ser relevante y permite trabajar sedimentos cohesivos bajo las leyes de los sedimentos no cohesivos.

El esfuerzo de corte que se calcula en el estudio de Taki (2001) tiene su fundamento principal en que el esfuerzo crítico de corte debido al flujo del agua es el que equilibra las fuerzas de Van der Waals sumadas con la carga superficial de las partículas.

Además predice que el esfuerzo crítico de corte disminuye exponencialmente con el aumento del peso específico de la pulpa generado por las partículas cohesivas. También es importante señalar que a medida que el contenido de agua de esta pulpa aumenta, sus características en cuanto al esfuerzo de corte comienzan a parecerse a la de los sedimentos no cohesivos.

Respecto a los patrones de comportamiento de pulpas cohesivos se distinguen principalmente 3 casos dados por la relación:

$$\frac{W}{W_L} \quad (2.18)$$

Donde

W = Contenido de agua

W_L = límite líquido de la pulpa

Si $\frac{W}{W_L} < 1.5$ contenido de agua de la pulpa depositado no excede el límite líquido de la pulpa y el esfuerzo de corte de fondo es mayor que el esfuerzo de corte crítico.

Si $\frac{W}{W_L} \approx 2$ Esfuerzo de corte de fondo supera levemente el esfuerzo de corte crítico.

Si $\frac{W}{W_L} \geq 2.5$ Esfuerzo de corte de fondo es mucho mayor que el esfuerzo de corte crítico (límite de destrucción del lecho).

Efecto electroquímico

La carga de las partículas (potencial Z), suele ser de entre -20 a +20 mv, fenómeno responsable de la alta viscosidad de las pulpas, esto sugiere que las partículas tienen una débil coagulación (Overbeek 1991).

Las partículas cercanas a 30 micrones usualmente exhiben cargas de -20 mv y se asocian a compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los lechos. Las partículas cohesivas comienzan a formar cadenas que resisten la resuspensión del material.

Fuerzas en las partículas.

Si bien en sedimentos no cohesivos las principales fuerzas son la gravitatoria y la friccional, para sedimentos cohesivos sería la carga eléctrica en la superficie de la partícula

$$F_d + F_w \sin(\theta_b) = (F_w \cos(\theta_b) - F_l - F_b) \tan(\phi) + F_c \tan(\phi) \quad (2.19)$$

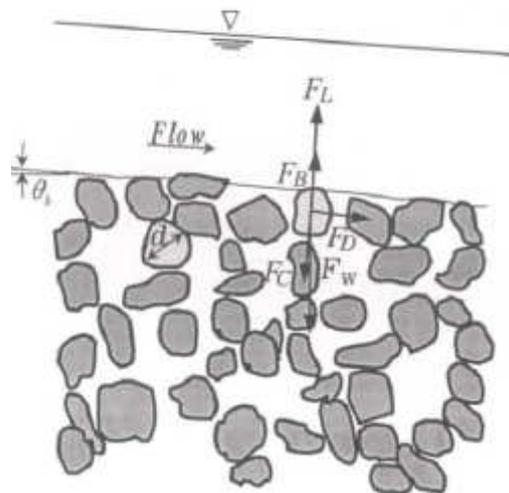


Figura 2.2: Equilibrio de fuerzas sobre partículas cohesivas (Taki, 2001)

Donde

F_d : Fuerza de arrastre debido al flujo de agua

F_w : Peso de la partícula

F_b : Fuerza boyante
 F_c : Fuerza cohesiva
 F_l : Empuje
 θ_b : Angulo del lecho
 ϕ : Angulo de reposo de sedimento

Esta es la ecuación básica de balance de fuerza en sedimentos cohesivos donde término más relevante corresponde a F_c , el cual depende de la suma de cargas de van der Waals que es el resultado de la carga de las partículas y del corte inducido por el flujo de agua.

Esfuerzo de corte crítico adimensional

Cabe destacar que la componente vertical de F_c , es primordial en el documento de Taki (2001) para lograr el cálculo del esfuerzo de corte crítico.

El esfuerzo de corte crítico propuesto por Taki (2001) muestra la siguiente expresión:

$$\tau_{*c} = \left((\cos(\theta_b)) \tan(\phi) - \frac{1}{R} \sin(\theta_b) \right) \frac{t^*}{\tan(\phi)} + \beta \left(\frac{1}{((\pi/6)(1+sW))^{1/3} - 1} \right)^2 \quad (2.20)$$

donde

t^* : Parámetro de Shields

β : Coeficiente relacionado a la atracción causada por la carga de la superficie de las partículas.

Se destaca que el primer término del lado derecho corresponde al esfuerzo de corte crítico para partículas no cohesivas, mientras que el segundo término representa el esfuerzo de corte viscoso, el cual dependerá del contenido de agua en la pulpa (W).

Otra manera útil para mostrar el contenido de agua en el pulpa es a través de la viscosidad no dimensional (η_*)

$$\frac{W}{W_l} = 32\eta_*^{-0.4} \quad (2.21)$$

donde

$$\eta_* = \frac{v_b}{\{(s-1)gd_s^3\}^{0.5}} \quad (2.22)$$

v_b : Viscosidad cinemática del pulpa.

Finalmente Taki (2001) concluye que mientras el contenido de agua en el pulpa aumenta, el esfuerzo de corte crítico total tiende asintóticamente a comportarse como el esfuerzo de corte crítico para partículas no cohesivas.

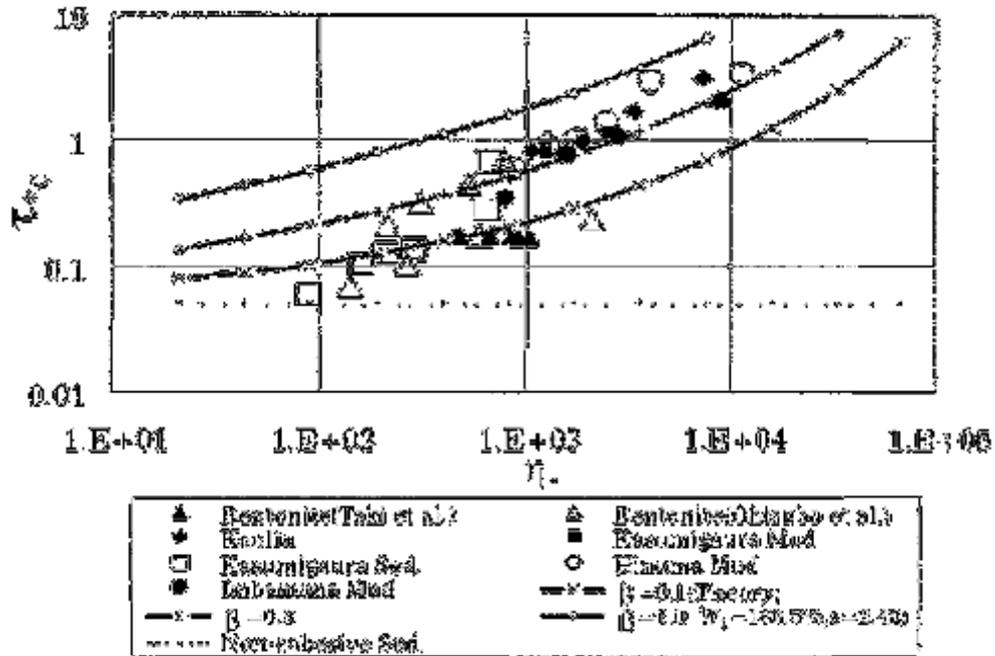


Figura 2.3: Variación del esfuerzo de corte crítico adimensional y la viscosidad cinemática de pulpas (Taki, 2001).

2.8 Gasto sólido de fondo

El punto de partida para la determinación de expresiones empíricas de gasto de sólido de fondo corresponde a las experiencias de Bagnold (1956), quien para llegar a su resultado propuso un equilibrio entre esfuerzos de corte de fondo y peso de la partícula transportada, el resultado de esto es una expresión para la tasa de transporte

$$i_b = \frac{1}{\mu_d} (\tau_0 - \tau_c) u_b \quad (2.23)$$

Donde

i_b : Gasto sólido de fondo transportado por la capa de arrastre de fondo

μ_d : Coeficiente de fricción dinámica

τ_0 : Esfuerzo de corte de fondo

τ_c : Esfuerzo de corte crítico

u_b : Velocidad media de las partículas en el fondo

Admás u_b se deduce de la siguiente expresión propuesta por Fernandez-Luque y van Beek (1976)

$$\frac{u_b}{u_*} = a(1 - b \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}\right)^{-\frac{1}{2}}) \quad (2.24)$$

Donde a es aproximadamente 11,5 y b aproximadamente 0,7

La tasa de transporte se puede expresar con la relación de Einstein, y con ambas expresiones relacionadas a través de la tasa de transporte se puede llegar a la siguiente relación.

$$q_s^* = \frac{1}{\mu_d} \tau_*^{1/2} (\tau_* - \tau_{*c}) \frac{u_b}{u_*} \quad (2.25)$$

Donde:

q_s^* : Gasto solido volumétrico por unidad de ancho

τ_* : Esfuerzo de corte de fondo adimensional

τ_{*c} : Esfuerzo de corte critico adimensional

Desde esta deducción distintos autores han llegado a resultados similares tales como Engelund y Fredsone (1976):

$$q_s^* = 18.74(\tau_*^{1/2} - 0.7\tau_{*c}^{1/2})(\tau_* - \tau_{*c}) \quad (2.26)$$

Meyer-Peter y Müller (1948):

$$q_s^* = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.27)$$

Ashida y Michihue (1972):

$$q_s^* = 17(\tau_*^{1/2} - 0.7\tau_{*c}^{1/2})(\tau_* - \tau_{*c}) \quad (2.28)$$

Fernandez –Luque y van Beek (1976):

$$q_s^* = 5.7(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.29)$$

Cabe destacar que estas expresiones son semi empíricas, y en el caso específico de Meyer-Peter y Müller se tiene que su base empírica cuenta con 251 experimentos que respaldan su formulación, por lo que usualmente es una relación que se usa para comparar magnitudes de resultados. Meyer-Peter y Müller, además usualmente sobreestima el gasto solido de fondo en comparación con otros autores.

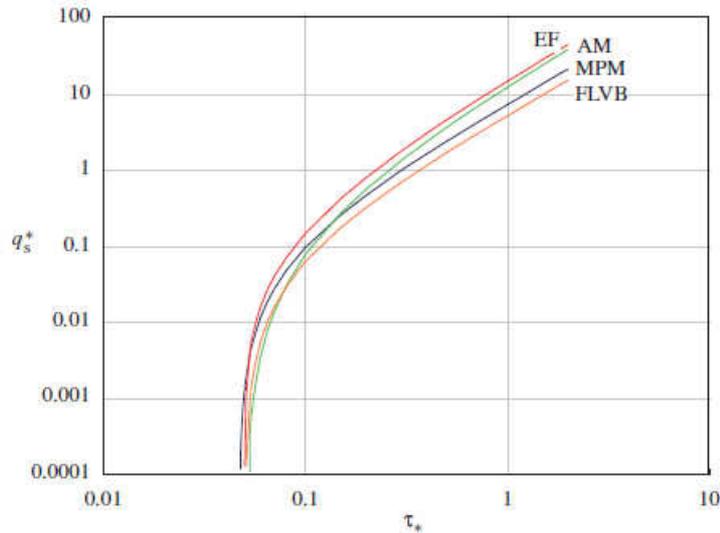


Figura 2.4: Relaciones adimensionales para el gasto sólido de fondo. MPM denota Meyer-Peter y Muller, EF denota Engenlund y Fredsoe, AM denota Ashida y Michiue y FLVB denota Fernandez-Luque y van Beek..

2.9 Experimentación descriptiva de infiltración de finos.

La experimentación de transporte e infiltración de finos data del año 1968 cuando Einstein a través de una experimentación con recirculación de partículas finas encontró que las partículas finas que viajaban en suspensión podían infiltrarse en lechos de grava a un profundidad sin límites ($Z_c = \infty$) o limitada ($Z_c < \infty$) dependiendo de una relación establecida como un cociente entre la granulometría del lecho y el sedimento fino usado (Beschta and Jackson 1979; Carling 1984; Diplas and Parker 1992). Experiencias posteriores (Wooster et al. 2008; Cui et al. 2008; Gibson et al. 2008, 2010, 2011; Dermisis and Papanicolaou 2014), han centrado sus esfuerzos en descubrir relaciones que describan el perfil de infiltración en el lecho de estos finos, esto para poder predecir bajo qué condiciones puede haber un límite para la infiltración.

El fenómeno estudiado respecto a la infiltración de fino y de cuando existe un límite para esta infiltración viene dada por el fenómeno de saturación de lecho o formación de puentes. Este fenómeno consiste en que las fronteras entre granos de lecho tienen espacio suficiente para dejar pasar a través de ellos partículas finas, sin embargo muchas veces puede existir un límite donde las partículas de finos se agrupan en estas fronteras grano a grano de los lechos, he impide el paso de más partículas de finos hacia mayores profundidades en el lecho

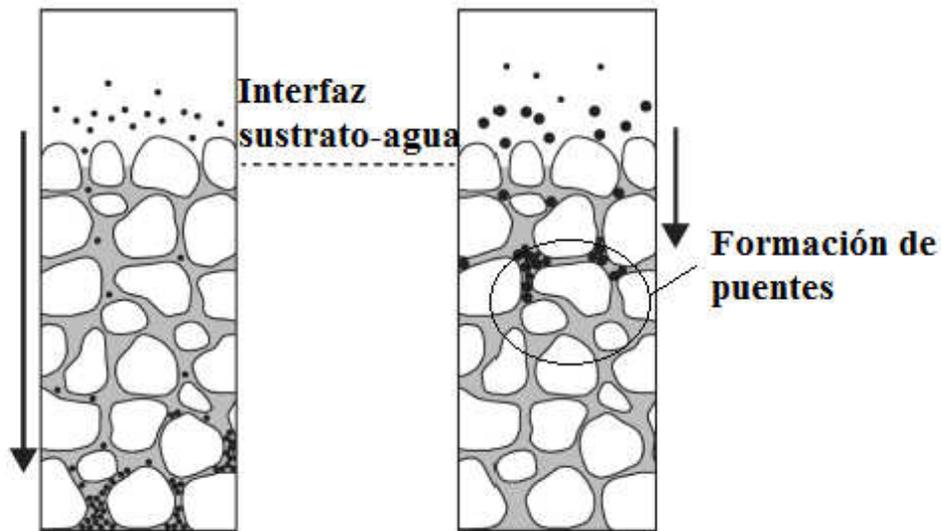


Figura 2.5: Esquema de los fenómenos de infiltración sin impedimentos y formación de puentes

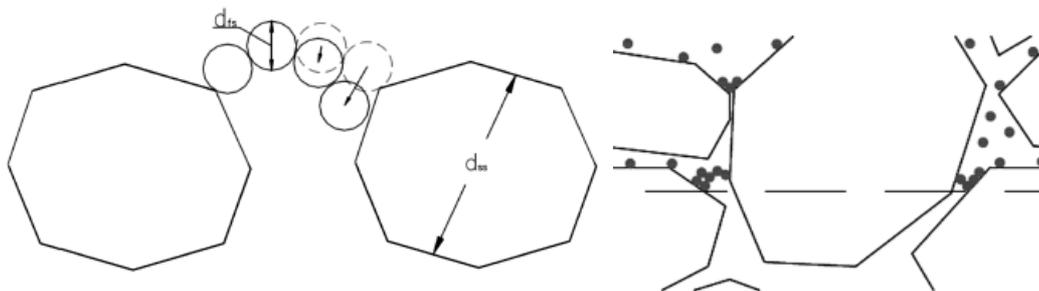


Figura 2.6: Detalle geométrico y esquemático de la formación de puentes

Huston et al. (2015) han tomado la mayor parte de los experimentos realizados hasta esos días y han hecho un trabajo basado en análisis dimensional para establecer cuáles son los parámetros de los cuales depende, primero, la infiltración sin impedimento y segundo, de haber infiltración finita, como encontrar ese límite.

Se ha concluido que la relación típica entre diámetros es la que mejor predice resultados de infiltración. Sin embargo otras variables como la porosidad, la velocidad de corte, la viscosidad, el diámetro del sedimento fino y grueso, y la permeabilidad del lecho, juegan un papel importante a la hora de encontrar relaciones que describan el fenómeno.

También se propuso (Huston et al. 2015) que siempre existía formación de puentes, pero que los pulsos de agua en los intersticios del lecho provocaban un impulso que rotaba los granos finos destruyendo los puentes y permitiendo infiltración hasta la profundidad del lecho donde el pulso de agua tuviese un impulso suficiente para superar el impulso crítico del puente de finos formado.

Estos estudios fueron desarrollados en base a resultados de 146 experimentos donde la mayoría del sedimento usado fue arena fina (no cohesiva).

La relación general entre granos encontrada en el estudio de houston et al. (2015) corresponde a:

$$\frac{d_{ss}}{d_{sf}}$$

Donde:

d_{ss} : Diámetro característico de granos que componen el lecho

d_{sf} : Diámetro característico del sedimento grueso

Huston et al. Demostraron que la relación de granos ajustada arrojaba una predicción más certera del tipo de infiltración, el parámetro de ajuste corresponde a la desviación estándar geométrica representada como:

$$\sigma_{ss} = \sqrt{\frac{d_{ss}^{85}}{d_{ss}^{15}}}$$

Donde d_{ss}^{85} es la responsable experimentalmente de las alturas de la rugosidad del lecho (Belcher and Fox 2011). Es así como Huston et al. Definen la relación de granos ajustada como

$$\frac{d_{ss}}{d_{sf}\sigma_{ss}} < 27 \text{ Formación de puentes} \quad (2.30)$$

$$\frac{d_{ss}}{d_{sf}\sigma_{ss}} > 27 \text{ Infiltración sin impedimentos} \quad (2.31)$$

Esta fue la principal conclusión del estudio de los experimentos históricamente realizados. Por otro lado, Gibson et al. (2009) realizaron una serie de experimentos con observaciones específicas del comportamiento de los finos en el transporte, estas observaciones ayudan a clasificar y entender de mejor forma la dinámica de estas partículas, esto se hizo a través de la relación de granos:

$$\frac{d_{ss}^{85}}{d_{sf}^{15}} \quad (2.32)$$

En la serie de experiencias de Gibson et. al. (2009) se analizaron las distribuciones de 4 tipos de arena en un lecho de grava, extrayendo el lecho (una vez finalizada la experiencia), y analizando capas verticales del lecho con arena, buscando las tendencias de distribución con la profundidad.

Los dos fenómenos de infiltración analizados fueron la formación de puentes y la percolación estática sin impedimentos (desde ahora USP, unimpeded static percolation).

Por otro lado la infiltración de finos se describe como una superposición de 3 fenómenos de transporte.

Segregación Granular: Las partículas más pequeñas llegan a mayores profundidades del lecho pasando por los espacios vacíos dentro del lecho. Este proceso es función del espacio libre y de la graduación del fino (siendo predominante la última), y no del flujo ya que experimentos con flujo y agua quieta arrojaron los mismos resultados en cuanto a la profundidad alcanzada por los finos.

Segregación Hidráulica: Se refiere a que los finos viajaran en el flujo preferentemente mediante suspensión, por lo que mientras más fino se espera que tenga un mayor alcance en el lecho desde el lugar de inyección de sedimentos, además una vez que han alcanzado el lecho son los más profundo penetran en este al ser los primeros en llegar.

Segregación por acarreo del lecho: refiere a que las partículas más pequeñas viajan más lejos y son las primeras en fijarse al lecho, pero evidenciar su intervención es mucho más complejo que distinguir que la segregación granular u hidráulica.

Para este estudio se definió como fino toda partícula menor a los $63 \mu m$. Por último se estudió si el esfuerzo de corte estaba relacionado con la infiltración.

Los principales resultados del estudio fueron:

- relaciones entre lecho y sedimento fino.

$$\frac{d_{15grava}}{d_{85arena}} > 15.4 \quad USP \quad (2.33)$$

$$\frac{d_{15grava}}{d_{85arena}} < 10.6 \quad \text{formación de puentes} \quad (2.34)$$

- Granos gruesos y de alta rugosidad forman un puente que deja una capa de sedimentos de espesor 2 a 5 veces el d_{90} del lecho de grava.
- La influencia del esfuerzo de corte de fondo tiene una posible doble interpretación donde investigaciones anteriores (Jackson, 1979; Middleton et al., 2000) señalan que si el esfuerzo de corte crece, la infiltración de la arena es más profunda, dado que grandes esfuerzos de corte destruyen los puentes de sedimentos formados permitiendo mayor infiltración, incluso si el esfuerzo de corte es muy grande puede socavar el lecho de grava permitiendo también más infiltración.

Pero la interpretación para partículas muy finas es que un alto esfuerzo de corte aumenta el fenómeno de segregación hidráulica arrastrando el material fino e impidiendo su depositación. En finos este esfuerzo de corte no alcanza los niveles necesarios para romper puentes ni socavar lecho, de esta manera no se genera una doble interpretación del fenómeno.

Por lo tanto para finos, menores esfuerzos de corte favorecen la infiltración dentro de lechos de grava, aunque la experiencia arrojó aproximadamente los mismos resultados de infiltración para grandes y pequeños esfuerzos de corte.

- Por último se analizó la granulometría de finos a través del estrato de gravas (eje Z) donde se encontró que en las mayores profundidades se encuentran las

partículas más finas del sedimento fino, corroborando la teoría de la segregación granular. En la Figura 2.8 b se puede ver que por cada capa del estrato, el D50 de los finos de cada muestra (muestras tomadas en planos XY del eje Z), tienen una granulometría menor que las muestras de las capas superiores, además cada figura del grafico representa un distancia de la muestra en relación al largo del canal (eje X) y además un experimento con agua en reposo (efectos de turbulencia y advección ausentes, dominancia de procesos de difusión). Respecto a las muestras en distancias aguas abajo se puede apreciar en la Figura 2.7 b que mientras más lejos ocurre la depositación del sedimento fino en el lecho, más fina es su granulometría

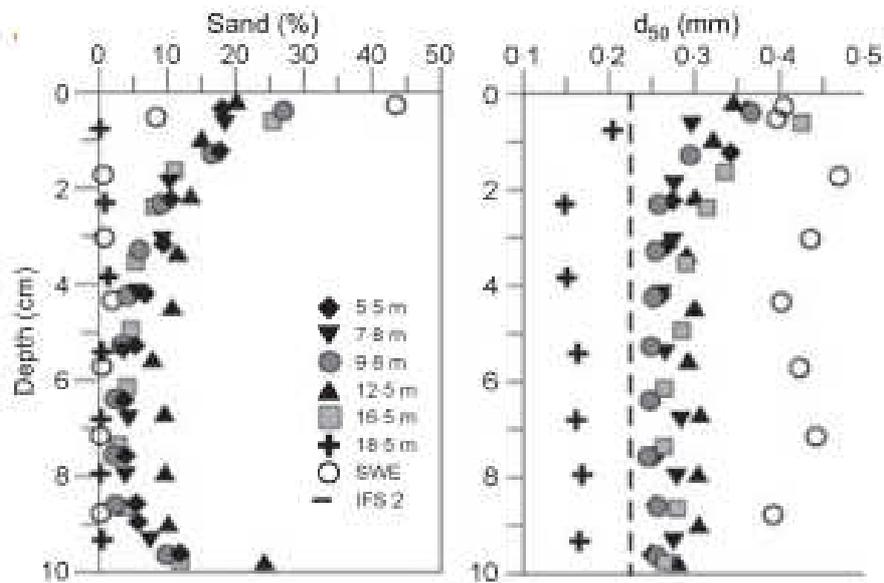


Figura 2.7: a) Contenido de arena y b) D50 del fino depositado, por tramo en seis posiciones diferentes de la pluma para el experimento 1 de Gibson et al. (2009)

3 Instalación experimental

3.1 Descripción general

Para estudiar el transporte y la estratigrafía de un derrame de concentrado de cobre sobre un lecho mixto de grava y arena, se cuenta con una instalación experimental que se adapta a las necesidades específicas de la experimentación con concentrado de cobre, más una serie de insumos e instrumentación asociada, para la medición de las variables estudiada. Estas se resumen a continuación.

La instalación experimental tiene por componente principal un canal de acrílico de largo 2.8 m y ancho 0.11 m, que descansa sobre un sistema de poleas engranadas, que permiten el cambio de pendiente. La parte final del canal tiene una grada que impide la movilidad del lecho y además un vertedero móvil que permite la regulación de la lámina de agua para asegurar flujo uniforme según los caudales usados. En su parte externa hacia el extremo inferior del canal, se tiene un sistema de bandejas móviles que permite direccionar el flujo hacia dos posibles estanques.

En la instalación se implementan dos estanques, uno (desde ahora estanque I) de 1000 lt que permite recolectar el concentrado de cobre que fluye en suspensión, y otro (desde ahora estanque II) de 235 lt que permite recircular el flujo una vez que la mayor parte del concentrado de cobre en suspensión es capturado en el estanque I.

Desde el estanque II se tiene una tubería de PVC de diámetro 50 mm que inicia en inferior de este y termina en una bomba la cual eleva el flujo hasta el inicio del canal y de esta manera producir la recirculación.

Se dispone de un dispensador de concentrado de cobre ubicado en la primera porción del canal, Este dispensador tiene forma cónica y tiene un tapón en tu extremo inferior, el cual removido manualmente, para evacuar el concentrado de cobre vertido en el dispensador, al flujo que escurre por el canal. El caudal inyectado está calculado empíricamente y se usó como estimación para solicitar concentrado de cobre a CODELCO Andina.

En el tramo de tubería PVC donde se dirige el agua desde la bomba hasta el inicio del canal se ha implementado un tubo de Venturi, en el cual, mediante la diferencia de presiones se calibra y ajusta el caudal pasante.

Se cuenta con una estación de tamizado, en donde se usan tamices con distinta apertura de malla, para poder hacer la granulometría de lechos y concentrado de Cobre.

Se cuenta con un horno industrial que es operado a una temperatura de 70°C para secar los sedimentos con concentrado de cobre en la etapa de desmontaje de la experiencia.

Para realizar la granulometría del concentrado de cobre se usa un granulómetro laser del laboratorio de sedimentos del departamento de Geología.

Para las fotografías y filmaciones de las experiencias se han implementado principalmente dos cámaras DSLR con lentes 18-55 mm una apoyada sobre una baranda con un carro móvil lo cual permite asegurar una distancia constante entre la cámara y la pared del canal y la otra cámara se usa sobre un trípode.

Se implementan lechos mixtos de arenas y gravas, desde, los cuales se cambian las arenas entre cada experiencia, para el estudio de infiltración y transporte.

Finalmente para la caracterización del flujo se implementa la técnica PIV, la que requiere de un láser, una cámara de alta velocidad y partículas de rodamina.

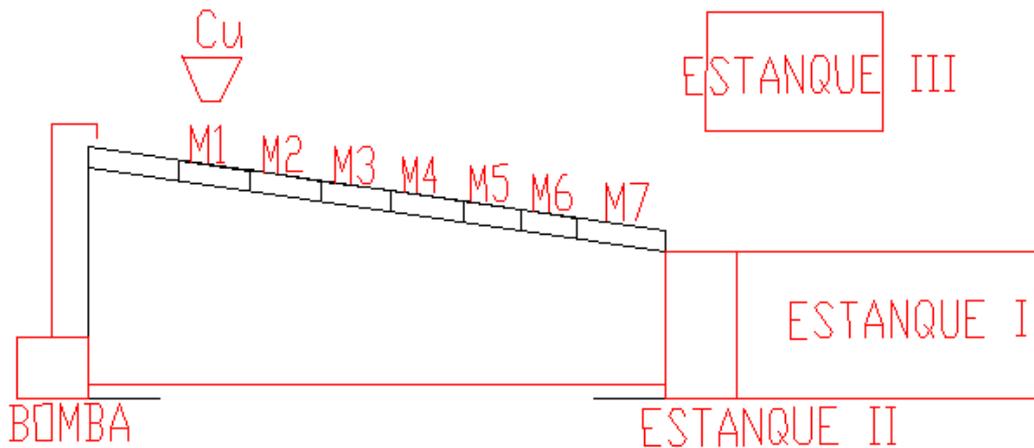


Figura 3.1: Esquema de instalación experimental

3.2 Canal

El canal de acrílico usado en la experiencia tiene una sección rectangular de ancho 0.11 m, altura 0.14 m y un largo total de 4.06 m, de los cuales 2.8 m tiene la sección rectangular descrita, y es el tramo en donde se hacen las filmaciones y mediciones.

La pendiente del canal se fija en 2 ángulos para las experiencias, estas son del 2.9 % y del 0.7%

Al implementar el lecho se procura hacerlo respetando estas pendientes uniformemente en todo el largo estudiado.

Al extremo aguas abajo del canal se encuentra un vertedero regulable el cual es usado a una altura de 0.055 m del fondo del canal, luego, existen dos bandejas acopladas que permiten dirigir el flujo a los estanques tanto de concentrado es suspensión (Estanque I) como al estanque de recirculación (Estanque II).

El canal, en sus 2.8 m de longitud es dividido en 6 tramos de estudio. El objetivo de esta separación es poder cuantificar, por tramo la cantidad de concentrado de cobre transportado para un tiempo fijo y así identificar qué tan lejos del derrame se produce la mayor acumulación o si existe un transporte entre el lecho cuantificable en el tiempo. Además algunas de estas secciones son filmadas para estudiar la infiltración de concentrado de cobre. Existe un séptimo tramo que corresponde a la zona aguas arriba del derrame de concentrado de cobre y está caracterizada por una sección que se angosta

desde los 0,2 m a los 0,11 m. Se resume en la Tabla 3.1 las características de los tramos en el canal.

Tabla 3.1: Características del canal

Id tramo	Área sección rectangular [m ²]	Largo [m]
M1	Variable 3:10*	0,5
M2	Constante 0,02 m ²	0,5
M3	Constante 0,02 m ²	0,495
M4	Constante 0,02 m ²	0,505
M5	Constante 0,02 m ²	0,405
M6	Constante 0,02 m ²	0,395
M7	Constante 0,02 m ²	0,62

* 3:10 indica la relación ancho-largo de la sección del canal durante 0,5m de largo de la sección

3.3 Sedimentos del lecho

El lecho implementado corresponde en primer lugar arena gruesa (Atterberg –sistema internacional) de 0.6 a 0.9 mm, esta granulometría de arena fue escogida tal que se cumpla las siguientes relaciones propuestas por Gibson et al. (2009).

- relaciones entre lecho y sedimento fino.

$$\frac{d_{15\text{arenalecho}}}{d_{85\text{fino}}} > 15,4 \quad USP$$

$$\frac{d_{15\text{arenalecho}}}{d_{85\text{fino}}} < 10,6 \quad \text{formación de puentes}$$

Donde, $d_{15\text{arenalecho}}$ corresponde a $d_{15\text{grava}}$ y $d_{85\text{fino}}$ corresponde a $d_{85\text{arena}}$

Dado que el $d_{85\text{fino}}$, que es concentrado de cobre, corresponde a 0.053 mm, si la arena del lecho es tiene un d_{15} menor a 0.56 mm el concentrado de cobre no podrá infiltrarse en el lecho, debido a que formará puentes que impedirá el paso de concentrado de cobre hacia partes más bajas del lecho.

Por otro lado si el $d_{15\text{arenalecho}}$ es mayor que 0.82 mm el concentrado de cobre avanzara sin problemas y rápidamente hasta el fondo del lecho.

Dado que se quiere estudiar fenómenos de transporte e infiltración, se necesita que las tasas sean bajas por lo que se usa una granulometría de arena gruesa de 0.6 mm, esto es el límite entre una arena fina y una arena gruesa (Atterberg –sistema internacional).

Con esta granulometría se esperarí que los esfuerzos de corte trabajen movilizand la arena del lecho, antes de poder movilizar el concentrado de cobre por el fondo del canal,

por lo que se implementa una coraza de grava de diámetro 1 cm, la cual asegura un rango amplio de operación de caudales, antes que se produzca el fenómeno de arrastre incipiente de sedimento para la grava, y así poder visualizar el arrastre de fondo del concentrado de cobre.

Se debe tener la precaución de que tanto la arena y la grava deben tener un color claro como blanco o amarillo para poder visualizar el transporte, esto, dado que el concentrado de cobre es oscuro.

Luego de las primeras experiencias se encontró que la relación propuesta por Gibson es inválida para el concentrado de cobre, por lo que se procede a experimentar con 4 granulometrías distintas de arenas para estudiar y extrapolar los fenómenos de infiltración de concentrado de cobre a otras granulometrías de lecho.

Las arenas usadas fueron identificadas con los siguientes dígitos, en el anexo A.2. se encuentra el detalle de las curvas granulométricas de las arenas.

Tabla 3.2: Identificación de arenas usadas en los experimentos

Id Arena	Rangos de diámetros [mm]	D50 [mm]
Arena 5	1,7-3,35	2.12
Arena 6	1,0-2,0	1.36
Arena 7	0,5-1,2	0.94
Arena 8	0,3-0,8	0.67

3.4 Concentrado de cobre (sedimento fino)

El material proveniente del proceso minero de flotación, posee una granulometría de 0.04 mm y está compuesto en aproximadamente un 30% de cobre, fierro (Fe)(20%), azufre(S) (35%) y sílice (Si)(5%).

El concentrado de cobre viaja por tuberías (Concentraductos), en forma de pulpa con una concentración en peso del 60 al 65%. Sin embargo, por la imagen obtenida desde El Mercurio el día del derrame y una experiencia preliminar de laboratorio en la cual el concentrado de cobre se vertió completamente seco, se observó que el concentrado de cobre viaja por el concentraducto posiblemente con un menor porcentaje de humedad, en pro de disminuir consumo el de agua en una cuenca con declaración de escasez hídrica. Es por esto que para las experiencias se ha optado por preparar una pulpa de concentrado de cobre con un 70 % de concentración en peso.

3.5 Dispensador de concentrado de cobre

Para el vertimiento de concentrado de cobre se diseña un dispensador para cargas aproximadas de 3 kg de concentrado de cobre seco (se dispone de una cantidad limitada de concentrado de cobre para desarrollar experimentos dado que la burocracia para su obtención tarda aproximadamente 3 meses), por lo que en base a P_{Cu} (peso de concentrado de cobre seco) y el ángulo aproximado de la generatriz del cono se dimensiona el dispensador de concentrado de cobre de forma cónica.

La idea del diseño es que el derrame ocurra en el menor tiempo posible y que el momentum generado por el derrame sea lo menor posible para no socavar el lecho.

Desde la expresión 2.1 cuya deducción se encuentra en el anexo A.1. se puede tener una idea aproximada de la generatriz necesaria para el dispensador y el tiempo aproximado que demora inyectar el concentrado de cobre al canal. En ese cálculo no se tiene en cuenta la influencia de las paredes ni la viscosidad de la mezcla de concentrado de cobre, sin embargo las diferencias entre el cálculo y el experimento son despreciables respecto a la duración de la experiencia.

$$\frac{0.1347 \cdot P_{Cu}}{\sqrt{g} \cdot A_s} \cdot \left(\frac{2 \cdot P_{Cu}}{\pi \cdot \tan(\theta)^2} \right)^{\frac{1}{6}} = t \quad (2.1)$$

Donde:

P_{Cu} : Peso de concentrado de cobre seco [gr]

A_s : Área de salida [cm²]

g : Aceleración de gravedad [cm/s^2]

θ : Angulo de generatriz [°]

t : Tiempo [seg]

El vertimiento ocurre de manera gravitacional una vez retirado un tapón dispuesto en el inferior del dispensador. La boquilla del embudo es ubicada lo más cerca posible de la superficie del flujo tal que su momentum sea el menos posible al llegar al lecho. El derrame tiene lugar en el tramo 2 del canal inmediatamente donde la sección del canal es constante.



Figura 3.2: Dispensador de concentrado de Cobre

3.6 Placa anti-socavación

Una placa de acrílico de espesor 0.5 mm y dimensiones 0.11m x 0.25 m es cubierta con gravas he implementada a una distancia de 10 cm del derrame de concentrado de cobre para evitar fenómenos de socavación. Las gravas son pegadas a la placa para no modificar el coeficiente de Manning del canal.



Figura 3.3: Placa antisocavación

3.7 Tubo de Venturi

Para saber el caudal impulsado por la bomba se realiza una calibración del tubo Venturi implementado en la porción ascendente de la tubería de recirculación. El tubo Venturi mediante el principio de conservación de masa, permite diferencias de presiones, debido a cambios en la velocidad del flujo provocados por disminución del diámetro de la sección de escurrimiento. Estas presiones son medidas a través de un tablero que cuenta con mangueras conectadas a las dos secciones características del tubo. Estas mangueras contiene Mercurio en su interior lo que permite apreciar diferencias en sus ramas, que son registradas gracias al tablero graduado milimétricamente.

Para realizar la calibración se procedió aforando nueve caudales, con una verificación mínima de tres y máxima de cuatro aforos por caudal, esto arrojó la siguiente curva de calibración., La propagación de errores de la presente curva se presenta en el anexo A.4.

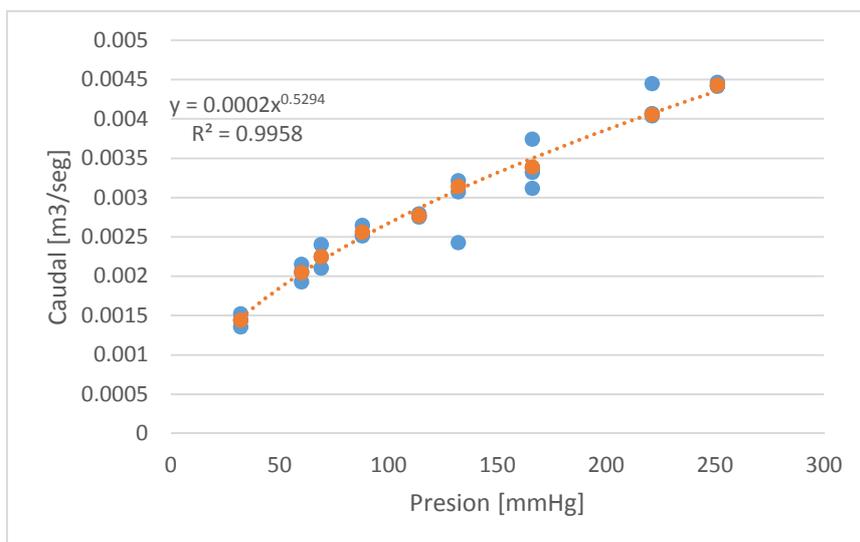


Figura 3.4: Calibración de caudales

3.8 Sistema de estanques

EL sistema de estanques implementados permite separar el experimento en el período de transporte de suspensión y el período de recirculación.

El primer periodo inicia con el vertimiento de concentrado de cobre y se extiende hasta que visualmente la turbiedad del flujo en el canal llega a un nivel constante y bajo. Todo el flujo de este periodo es colectado en un estanque blanco de 1000 litros (Estanque I), y se deja sedimentar para extraer el agua de la parte superior, luego el concentrado de cobre sedimentado es colectado mediante palas y brochas. Existen ocasiones en las cuales el lecho del canal se socava por el vertimiento del concentrado de cobre, en estos casos el periodo de transporte en suspensión puede extenderse hasta incluso no alcanzar un estado de baja turbiedad visual.

El periodo de recirculación se extiende hasta el fin de la experiencia, para este periodo se usa en estanque azul de 235 litros (Estanque II). Existen ocasiones donde el periodo de transporte de suspensión se extiende más de lo esperado por socavaciones parciales del lecho, o por el uso de altos caudales; en esas situaciones se implementa el apoyo de un tercer estanque que alimenta con agua limpia al Estanque II para que siga existiendo recirculación de agua y no entre aire en el sistema.

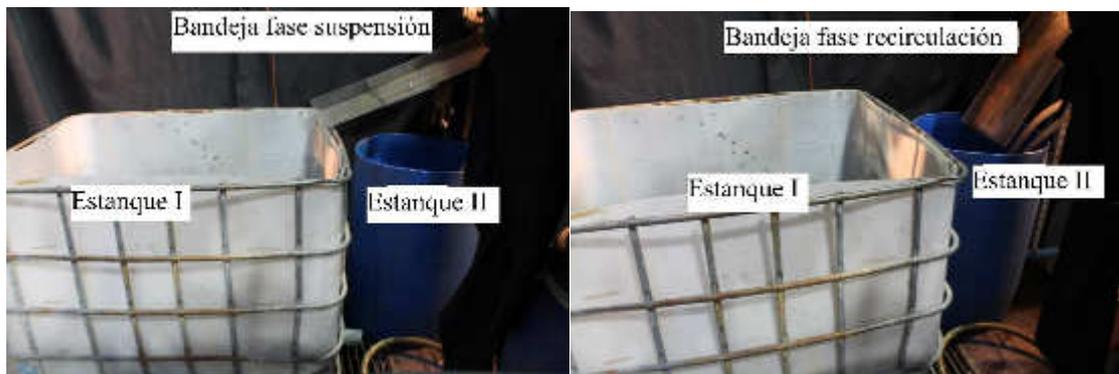


Figura 3.5: Sistema de estanques.

3.9 Recirculación

La recirculación consta de un tubo PVC y una bomba.

El tubo PVC tiene dos tramos uno horizontal encargado de dirigir el flujo del estanque 2 a la bomba y un tramo vertical encargado de dirigir a impulsión de la bomba al inicio del canal, es en este tramo donde se ubica el tubo de Venturi.

La bomba implementada corresponde al modelo Ebara Pumps 3M 50-125/3 que permite operar hasta a un caudal de 20 lt/seg o una altura máxima de 18 m. La curva de la bomba podrá ser encontrada en el anexo A.3.

3.10 Estación de tamizado

Para realizar las curvas granulométricas del lecho, en especial del lecho posterior a la experiencia se usa una estación de tamizado que permite ordenar tamices en línea y orden descendente. De esta manera se pesa el material retenido en cada malla mediante una balanza digital, de sensibilidad 0.1 gr y capacidad máxima de 6 kg. La estación de tamizado tiene un motor vibrador en su parte superior, que permite de manera automática realizar la separación de los sedimentos.



Figura 3.6: Estación de tamizado.

3.11 PIV

Para la ejecución de la técnica PIV es necesario contar con una lista de insumos para generar filmaciones para su posterior procesamiento.

La técnica PIV consiste en estimar la evolución de la posición de las partículas entre dos instantes de tiempo para una posición determinada (enfoque Euleriano de estudio de velocidades de flujo).

Las partículas se siguen mediante una filmación con una cámara de grabación de alta velocidad que permite una alta tasa de cuadros por cada segundo de filmación.

Las partículas que son seguidas en la filmación corresponden a partículas de plástico con rodamina. Estas partículas corresponden a una mezcla de resina con rodamina, mezcla que se solidifica y posteriormente es pulida hasta obtener partículas de algunas décimas, lo importante de estas partículas es que tienen una densidad muy similar a la del agua y son iluminadas por un láser. Las partículas reflejan el láser tal que, al momento de filmar, estas se ven “iluminadas”.

Para que la filmación de partículas iluminadas con láser sea exitosa se requiere que el ambiente de la filmación sea lo más oscuro posible, por lo que se debe implementar una zona oscura, instalación que consiste en una estructura de PVC, cubierta con telas oscuras.

La implementación de PIV ocurre en el tramo 6 que es el tramo más estable debido a su lejanía respecto al angostamiento del canal y presenta una altura de flujo uniforme.

El láser implementado es de la marca Flex BW TEC, modelo BWI-532-100-E_66969. Este láser cuenta con una fuente de poder encargada de proveer la energía necesaria para generar el haz de luz que ilumina el plano de interés en el canal (plano XZ).

Para filmar se usa la cámara PHOTRON FASTCAM SA3, la cual puede grabar 2,72 segundos a una tasa de 1000 cuadros por segundo (resolución de 2024x1024 píxeles) debido a su limitada capacidad de almacenamiento, a menores resoluciones puede llegar a grabar con una tasa de hasta 12000 cuadros por segundo

4 Metodología experimental

4.1 Montaje de experiencia

4.1.1 Pendiente del canal

El inicio de la experiencia requiere fijar una pendiente para el trabajo, dados los comportamientos estudiados en los experimentos de aproximación, se determinó que para las primeras experiencias, se necesitaba un esfuerzo de corte considerable para movilizar el concentrado de cobre en el lecho, por lo que se trabajó en esas experiencias con pendientes del 2,5 %.

Una vez completado el conjunto preliminar de experiencias, se determinó usar una pendiente similar a ríos de montaña en Chile, fijando la pendiente del canal en 0.7 %.

Esta pendiente fue medida con huincha y nivel, y se calculó como el cociente entre el desnivel de dos ubicaciones al extremo del canal y la distancia horizontal que los separaba.

4.1.2 Instalación de lechos

Mediante la implementación de topes fijos en cada tramo de canal se procede a instalar placas de acrílicos delgadas del tamaño de la sección del canal, de esta manera se puede construir el lecho por tramo sin que exista un traspaso de material (arenas o gravas) de una sección a otra.

En el canal el lecho se construye con un espesor de 3 cm de arena y 2 cm de grava, todo el material usado en la construcción de cada tramo es pesado en una balanza digital de precisión 0,1 gr y carga máxima 6 kg.

Se tiene el debido cuidado en el tramo 2 que es el tramo de vertimiento de concentrado de instalar la placa antisocavación intentando que se acople de la manera más uniforme posible con la parte superior del lecho del resto del canal, con tal de no modificar el coeficiente de Manning del canal.

4.1.3 Concentrado de cobre

Para preparar la mezcla primero se seca totalmente una porción de concentrado con humedad desconocida.

Se tamiza el concentrado mediante el uso de la malla #200 y #100 (75 μm y 150 μm respectivamente), ya que al ser una sustancia cohesiva, al secarse, forma bloques de concentrado de cobre, donde las interacciones electroquímicas entre sus partículas son de gran importancia porque forman grumos que encapsulan aire y concentrado que no logrará hidratarse durante la experiencia.

Se extrae una muestra seca y tamizada de 3 kg, para ser hidratada tal que el 70% de la mezcla (en peso) sea concentrado de cobre; por lo que se usan 1.286 gramos de agua.

Esta mezcla es revuelta vigorosamente y se mantiene en permanente agitación para evitar la sedimentación de la muestra, la muestra agitada es dispuesta en el embudo con tapón, sobre el tramo 2 del canal.

4.1.4 Sistema de cámaras e iluminación

Se disponen de tres cámaras para la filmación de la experiencia dos de ellas son cámaras DSLR de similares características que se detallan en la Tabla 4.1

Tabla 4.1: Instrumentación de filmaciones

Cámara	Lente	Diámetro lente	Tramo de filmación
Canon 1100 D	18-55 mm	58 mm	2
Nikon D 3100	18-55 mm	50 mm	6

Las dos cámaras DSLR se implementan con filtros polarizadores en sus lentes para disminuir reflejos del acrílico del canal.

La tercera cámara es una cámara de alta velocidad 8 PHOTRON FASTCAM SA3) que sirve para estudiar tasas de infiltración en el lecho del canal y hacer PIV.

Se monta la iluminación del cuarto oscuro de manera de obtener una luminosidad constante entre un experimento y otro (Esto facilita el post procesamiento de los videos).

4.1.5 Caudal

Se fijan dos caudales, uno que asegure un flujo uniforme y una altura de lámina de agua mínima de 3 cm, mientras que el otro caudal, es tan grande tal que no produzca arrastre incipiente de gravas.

Estos caudales corresponden a una diferencia de presiones en el tubo de Venturi tal que con la calibración expuesta en la sección 3.7 se obtenga los caudales 1,2 lt/seg y 3,1 lt/seg

4.1.6 Altura Vertedero

La altura del vertedero se fija en 5,5 cm desde el fondo del canal (y no de la grada) tal que asegura un flujo uniforme, tal que, $\frac{dh}{dx} = 0$, para el tramo del canal donde se va a implementar la técnica PIV, para el caudal mínimo escogido.

Caudales mayores, por lo tanto, también tendrán altura normal dado que el escurrimiento es subcrítico.

4.2 Procedimiento experimental

Luego de montar el lecho el procedimiento experimental consta de tres etapas:

- PIV antes del vertimiento del concentrado de cobre
- Vertimiento del concentrado de cobre (fase de suspensión y fase de recirculación)
- PIV después del vertimiento de concentrado de cobre

La realización de dos métodos PIV por experiencia responde al cambio del perfil de velocidades esperado debido a la infiltración del concentrado de cobre en el lecho, esta infiltración podría cambiar la resistencia hidráulica del lecho.

Para realizar ambos métodos PIV se procede de la misma forma, las únicas diferencias se basan en que para el PIV después del vertimiento de concentrado de cobre requerirá añadir rodamina al flujo y controlar la temperatura del agua debido a su permanente recirculación.

4.2.1 Procedimiento PIV

Se oscurece lo más posible la cámara oscura que abarca los 4 metros del canal, se monta el láser sobre el canal apoyado en topes fijos de acrílico, lo que asegura que el montaje del láser quede completamente perpendicular al flujo.

En la sección 3.11 PIV se ha explicado de manera resumida la utilidad y características de las partículas de rodamina. El tubo sólido de resina mezclada con rodamina es donde se fabrican las partículas de rodamina. Para crear estas partículas se ha implementado distintos métodos que consisten en pulir la superficie del tubo, a través de distintas herramientas abrasivas tales como un Dremel con accesorios tipo lija o molinillos que muelen los tubos mediante un trituradoras, sin embargo, el que mejor resultados arrojó a la hora de la experimentación, fueron las partículas fabricadas a través de un torno y pulidas a mano, con la ayuda de una lima metálica. Las principales diferencias de las distintas metodologías fue la granulometría obtenida. Con el método “Dremel”, se obtienen partículas extremadamente finas lo cual provoca que mediante la técnica PIV se obtenga un grado de reflexión alto que no permite individualizar las partículas y da el efecto de “nube luminosa”; Por otro lado la técnica del molinete arroja partículas demasiado gruesas que se ven afectadas por fenómenos de sedimentación y no aseguran una buena densidad de partículas para estudiar de manera Lagrangeana la distribución de velocidades del flujo. Por último el método Torno-lima, clasificado a través de la malla #200 ha sido la metodología más efectiva dado que no se producen efectos de reflexión excesiva ni sedimentación obteniendo imágenes limpias para su mejor procesamiento.

Se mezclan 15 gr de rodamina en 500 cc de agua, agitándose vigorosamente durante no menos de 15 minutos de tal manera de asegurar una buena mezcla sin tantos grumos ni encapsulamientos.

La mezcla de rodamina y agua es vertida en el canal dosificadamente en aproximadamente 100 cc por vertimiento. Se espera un tiempo a que la recirculación de la rodamina se estabilice y alcance una densidad constante de partículas.

El láser es ubicado en el punto medio del tramo 6 del canal, y mediante una placa de acrílico móvil en el eje X y fija para los demás ejes se procede a configurar perpendicularmente a la sección transversal del canal el haz de luz (paralelo al flujo). De esta manera se ilumina el plano XZ de interés, el haz de luz ilumina las partículas de rodamina vertidas en el canal.

Mediante el software PIVLab, se procede a establecer el foco de la cámara de alta velocidad tal que se distingan las partículas de rodamina iluminadas con el láser. Se capturan fotografías de calibración, es decir, fotografías que están asociadas a una huincha en el canal, tal que se puedan vincular durante el procedimiento de procesamiento de imágenes, cuantos pixeles existen por cada milímetro de huincha. Luego de configurar el software en cuanto a la luminosidad ambiental y la frecuencia de muestreo que se establece en 10000 frames por segundo (esto más la capacidad interna de almacenamiento

de la cámara determinan que la duración de las filmaciones serán aproximadamente de 4 seg). Dadas las experiencias de PIV de otros memoristas (Fuentes, 2017) se filmará un total de 90 seg de video, esto obliga a hacer un aproximado de 22 filmaciones por cada PIV, es decir, un total de 66 filmaciones antes de verter el concentrado de cobre.

4.2.2 Vertimiento del concentrado de cobre

Una vez realizado el PIV, se procede a prender luces de la cámara oscura, y prender las cámaras DSLR.

Previamente se ha preparado una mezcla de concentrado de cobre y agua con concentración del 70% en peso. Esta mezcla es depositada desde su recipiente de mezcla al dispensador de concentrado de Cobre.

La mezcla de concentrado de cobre es permanentemente agitada en el dispensador de concentrado de cobre y se coordinan los tiempos para iniciar el vertimiento de concentrado por la extracción del tapón del dispensador.

Fase de suspensión

Una vez que el tapón es extraído del dispensador inicia el vertimiento de concentrado de cobre, el tiempo de vertimiento coincide aproximadamente con la estimación analítica de la sección 3.1.4.

El concentrado de cobre vierte sobre el escurrimiento modificando instantáneamente el flujo durante el tiempo del derrame, debido al momentum con el que llega. Este vertimiento luego de pasar por el escurrimiento se enfrenta con la placa antisocavación dispuesta en el lecho, de manera de no prolongar la etapa de suspensión del concentrado de cobre ni enfrentarse al arrastre de arenas debido a la exposición que suponía la alteración del estrato de grava en experiencias de aproximación.

Se dirige el flujo de agua y concentrado de cobre en suspensión al estanque I durante aproximadamente 30 segundos, este tiempo varía con los caudales, y varía si existe socavación del lecho por errores en el posicionamiento de la placa.

Para caudales altos es necesario el apoyo del estanque III para que alimente al estanque II con tal que no entre aire a la bomba.

Fase de recirculación

Una vez que el flujo por el canal alcanza una turbiedad baja y constante, el flujo se redirige al estanque II y es aquí donde la experiencia del vertimiento de concentrado termina. Se procede a realizar el método de PIV después del vertimiento de concentrado de cobre con una metodología idéntica a la usada en el PIV antes del derrame de concentrado de cobre.

Cuando se han alcanzado las condiciones constantes mencionadas, las filmaciones se detienen y se registra con fotografías el estado final de la infiltración en el lecho más una filmación continua del canal debido a una baranda de aluminio completamente paralela al canal.

Luego de esto se hacen los preparativos para la realización del PIV después del vertimiento de concentrado de cobre.

4.3 Desmontaje de experiencia

4.3.1 Concentrado de cobre de fondo

Para el desmontaje de la experiencia se debe proceder de manera cuidadosa, debido a que es necesario individualizar los distintos tramos del canal. Para esto, las placas delgadas de acrílico con un tamaño similar al de la sección del canal, vuelven a colocarse en los distintos topes de acrílico que definen los tramos.

Se levanta el vertedero con tal de drenar el agua residual del canal, se ubican las placas de acrílico para individualizar los tramos.

Mediante una pala se comienzan a extraer los distintos tramos del canal y se depositan en bandejas de Pyrex, por lo que cada bandeja contiene un tramo específico del canal y está compuesto por gravas, arenas y concentrado de cobre. Cabe mencionar que es importante el uso de bandejas de Pyrex para la manipulación del concentrado, dado que materiales como el aluminio, reaccionan con la arena contaminada y el concentrado de cobre creando óxidos sobre la bandeja.

No todo el material de cada tramo es extraíble debido a la humedad. Es por ello que con una espátula se barre los residuos de concentrado de cobre hasta el centro de cada tramo, de manera tal que se eviten mezclas de material entre tramos. Estos residuos son dejados en el canal para que se sequen mediante focos y condiciones ambientales, para que una vez secos sean barridos por brochas, recolectados por palas e integrados a las bandejas de su tramo respectivo

Las bandejas son dispuestas en un horno por no menos de 24 horas y al retirar se pesan en la balanza donde se pesó el lecho para su montaje.

El peso de la bandeja del tramo más el peso del residuo del tramo es siempre mayor al peso del tramo original, y la diferencia corresponde al concentrado de cobre transportado hasta ese tramo.

Una vez realizado el desmontaje del lecho, el secado y pesado de cada tramo, se tamiza cada tramo tal de encontrar la curva granulométrica de cada tramo, para esto se usan las mallas #4, #6, #8, #16, #30, #40, #70 y #200. Esto sirve también para corroborar que se desmontó y pesó correctamente el lecho.

Todo el material que pasa la malla 200 y queda retenido en esta, corresponde a concentrado de Cobre y es denominado “de fondo”. Una muestra de este material es tomada para hacer su granulometría específica en el laboratorio de sedimentos del Departamento de Geología.

4.3.2 Concentrado de cobre de suspensión

Durante el experimento en la etapa de suspensión, el agua con concentrado de cobre fue dirigida hacia el estanque I de capacidad 1 m^3 , con esta capacidad de estanque se aseguraba que para el caudal más alto implementado en la experimentación, se iba a tener

un tiempo máximo posible para la etapa de suspensión de 6,8 min antes de completar la capacidad máxima.

Para la recuperación del concentrado de cobre se debe pasar por una etapa de sedimentación dado que la granulometría de las partículas presentes en el estanque I son inferiores a los 40 μm pero mayores a 1 μm , por lo tanto son suspensiones y no diluciones.

Para asegurar una buena sedimentación del concentrado de cobre, el estanque I es dejado en reposo al menos durante 24 hrs, luego mediante mangueras de silicona previamente dispuestas en el estanque I (desde algunos centímetros del fondo del estanque I pasando por su borde superior y llegando a la sentina donde permanecen colgando a unos centímetros bajo la cota del fondo del estanque), se procede a vaciar el estanque usando una jeringa conectada a la manguera para dirigir el fluido en reposo hasta una cota inferior y así, por diferencias de Bernoulli conseguir un drenaje completo de estanque I sin extraer concentrado de cobre sedimentado.

Una vez extraída el agua del estanque I se debe secar el concentrado de cobre hasta una consistencia semilíquida, tal que permita extraerlo a bandejas de Pyrex mediante palas plásticas. Los residuos de concentrado de cobre en el Estanque I deben ser secados a temperatura ambiente, pistolas de calor y/o focos luminosos, para posteriormente ser recolectado con el uso de brochas para su disposición en la bandeja de Pyrex de suspensión.

La Bandeja de Pyrex de suspensión contiene todo el concentrado de cobre recolectado en el Estanque I. Se dispone en un horno para extraer toda la humedad presente y de esta manera obtener el peso del concentrado de cobre en suspensión.

La última etapa de este proceso es extraer una muestra de la bandeja de concentrado de cobre en suspensión, para obtener su granulometría el laboratorio de sedimentos en el Departamento de Geología

4.4 Procesamiento de resultados

4.4.1 Procesamiento de datos

Desde fotografías y videos obtenidos de la experimentación se debe procesar las imágenes del estado final de la infiltración, para esto las imágenes son operadas con el programa de procesamiento y edición digital de fotografías, Lightroom y el software Matlab.

Mediante el uso de Lightroom, se rota la imagen, dado que el canal posee una inclinación y la cámara esta nivelada, es necesario corregir la inclinación de la imagen, luego mediante los tratamientos de tonalidades blanco y negro se procede a acentuar el contraste entre arena limpia y arena con concentrado con el fin de obtener fácilmente la máxima percolación. La imagen procesada es importada con el programa Matlab.

Una vez la imagen está en Matlab se le aplican funciones que permita pasar desde una imagen RGB (matriz 3D) a una imagen en grises (matriz 2D), lo cual permite definir un umbral de luminosidad que permita diferenciar la arena limpia de la arena contaminada. El umbral de luminosidad es aplicado a la matriz que representa la imagen mediante funciones operadores for, esto arroja una imagen con dos tipo de pixel, el que tiene concentrado de cobre y el que no.

Mediante una función `bwareaopen` se limpian píxeles en zona de arena limpia que figuran como concentrado de cobre y mediante un nuevo `for` se recorre la matriz 2D rescatando la posición de máxima infiltración y se guarda en un vector (1D). Finalmente este vector es escalado desde píxeles a su equivalente en cm.

Una vez obtenidos los vectores de posiciones de todos los tramos para todos los caudales, estos son montados en un gráfico que permite comparar las magnitudes de infiltración según los parámetros modificados (caudal y granulometrías).

4.4.2 PIV

Mediante el complemento programado en m-file `PIVlab`, se procede a tratar las imágenes captadas a través de la cámara de alta velocidad las etapas del procesamiento incluyen: ajustar una máscara adecuada para acelerar el procesamiento, ajuste de filtros para mejorar luminosidad de partículas, el procesamiento propiamente tal que toma por lo general 24 hrs, interpolación de datos, calibración y almacenamiento de resultados, todo esto con un gran consumo de recursos computacionales y memoria.

Los datos entregados por `PIVlab` del procesamiento de las imágenes de PIV, deben ser ordenadas mediante las manipulaciones de matrices para obtener los datos necesarios para estimar perfiles de velocidad y esfuerzos de corte. Estos procesamientos requieren considerar que la velocidad del flujo es entregada en números negativos y en un orden de eje z inverso.

Posteriormente los datos ordenados y clasificados, deben ser procesados mediante scripts de Matlab para obtener relaciones adimensionales para velocidades y esfuerzos de corte y de esta manera relacionarlos con los caudales pasantes.

4.4.3 Concentrado de cobre

El concentrado de cobre en el canal es obtenido mediante dos metodologías. La primera consiste en comparar los pesos del lecho antes y después de vertimiento, y de esta manera saber cuánto concentrado de cobre existe en un determinado tramo, Esto es corroborado mediante la elaboración de granulometrías de lecho, donde se obtiene la porción de concentrado de cobre de cada tramo, verificando que los resultados de la resta realizada sea consistente.

Se realiza granulometría del concentrado de cobre en cada tramo del lecho para verificar la uniformidad de ésta a lo largo del lecho y para descartar que irregularidades en la máxima infiltración del concentrado de cobre en el lecho estén relacionado a cambios parciales de granulometría del concentrado de cobre.

Además, se realizan granulometrías del concentrado de cobre que viaja en suspensión para establecer una posible relación de sedimentación infiltración con la distancia desde el derrame.

5 Resultados

Con un total de siete experimentos definitivos, se presentan los resultados que se dividen en dos grupos.

El primer grupo consiste en la serie de cuatro experimentos en los que se estudia la infiltración del concentrado de cobre en función de las granulometrías de las arenas del lecho mixto. El segundo grupo consiste en estudiar los cambios en la infiltración del concentrado de cobre, para dos granulometrías seleccionadas desde el primer grupo de experimentos, al variar el caudal que fluye por el canal.

Se presentan los resultados de PIV para las experiencias, resultados desde los cuales se extraen los esfuerzos de cortes de los caudales pasantes

Finalmente se presentan los resultados del transporte de concentrado de cobre por tramo, esto para el concentrado de cobre que alcanza el lecho y el concentrado de cobre que se transporta en suspensión.

5.1 Resumen de experimentos

Los experimentos se desarrollaron primeramente con el objetivo de encontrar una tasa de transporte de fondo de concentrado de cobre. Para esto se necesitaban grandes esfuerzos de cortes que no se lograron conseguir en experiencias preliminares, por esto se fijó una pendiente fuerte del 4,7 %, el caudal se fijó en 1,95 l/s. Durante la experimentación no se detectó un movimiento de concentrado de cobre una vez alcanzado un estado final, por esto se procedió a cambiar los objetivos del estudio a profundidades de infiltración.

De esta manera en cada una de las primeras cuatro experiencias, el lecho del canal es modificado en su porción de arena a las cuatro granulometrías especificadas en la sección 3.3, con el objetivo de encontrar relaciones de granulometría y profundidad de infiltración.

El segundo conjunto de tres experimentos se implementó con una menor pendiente, esto tiene por objetivo poder estudiar resultados después de una gran variación de caudales. Esto no era posible con una gran pendiente ya que al variar levemente los caudales se producían arrastre incipiente de gravas.

Todas las figuras que se presentan a continuación la dirección del flujo es de derecha a izquierda

5.1.1 Experimento 1 arena 8

Durante esta experiencia se implementó por primera vez un lecho mixto de arenas y gravas, donde las gravas fueron dispuestas como coraza del lecho.

Se establecieron cuatro tramos para cuantificar el transporte de concentrado de cobre en un tramo recto de 1,5 m de distancia.

Durante la experimentación se produjo un derrame de concentrado de cobre que socavó el lecho en la zona de derrame, lo que provocó un largo periodo de suspensión y más tarde un transporte por saltación de arenas sobre las gravas. Además no se ha conseguido un régimen completamente uniforme para el desarrollo del experimento.

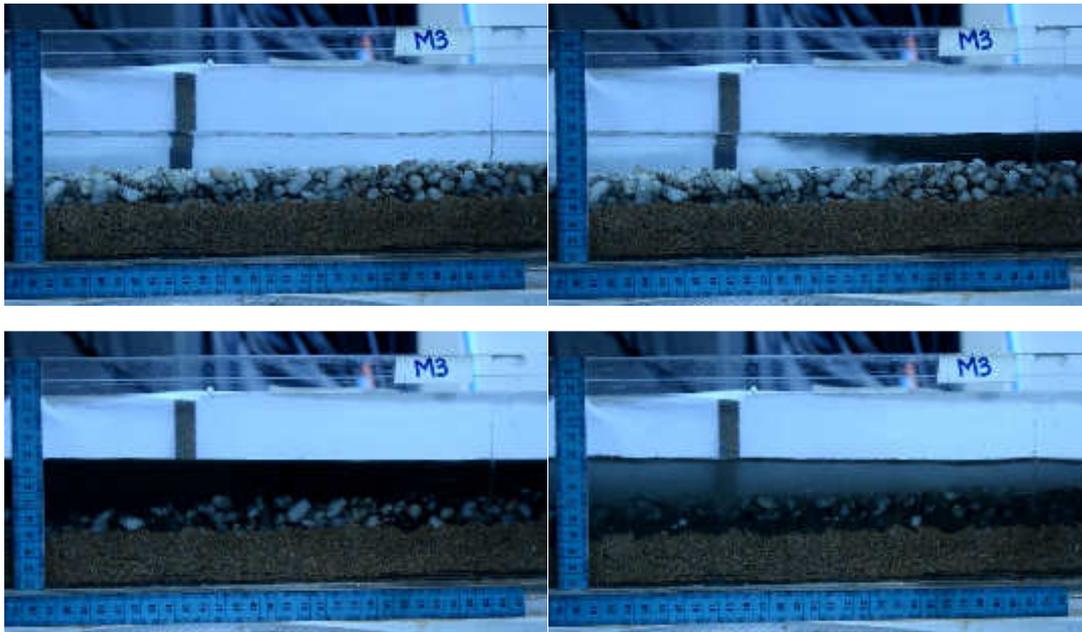


Figura 5.1 a) Lecho previo al derrame de concentrado de cobre; b) Concentrado de cobre en suspensión; c) Inicio de infiltración; d) fin de infiltración.

Desde la Figura 5.1 a) a d) se puede ver el proceso normal que se da en los experimentos sin socavación.

Posteriormente se inicia el proceso de transporte de la arena, lo cual hace imposible pesar los tramos del canal para cuantificar la presencia del concentrado de cobre



Figura 5.2: Transporte de arenas

Una vez alcanzado ese punto se procede a hacer un experimento con fines descriptivos. Estos experimentos consisten en aumentar el caudal para ver si existe una mayor percolación en los distintos tramos del canal.



Figura 5.3: a) Aumento de Caudal 1; b) Aumento de caudal

En las Figuras 5.3 a) y b) se pueden ver aumentos en el caudal pasante, sin embargo, la infiltración no cambia.

El aumento de caudal implica un aumento en los esfuerzos de corte, es por esto que luego de aumentar los caudales al máximo permitido por la instalación, se implementa una placa de acrílico que simule una compuerta que cambia el régimen de flujo y aumente los esfuerzos de corte.

La placa de acrílico es implementada al costado derecho de las Figuras 5.4, y en cada imagen se aprecia un desplazamiento de la compuerta tal que disminuye el área de escurrimiento bajo esta.

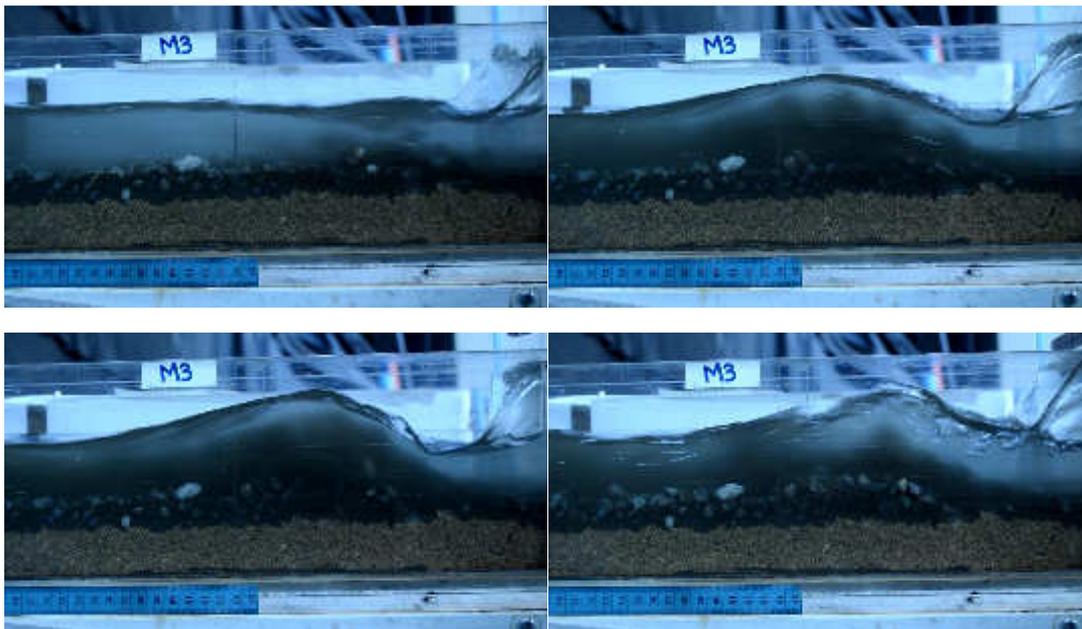


Figura 5.4: a) Compuerta acrílico 1; b) Compuerta acrílico 2; c) Compuerta acrílico 3; d) Compuerta acrílico 4.

Entre las Figuras 5.4 se puede observar la socavación y el transporte de sedimentos provocados por la implementación de la compuerta de acrílico en el extremo derecho de las imágenes; La implementación de la compuerta de acrílico hace que por conservación de masa la velocidad del flujo bajo esta compuerta aumente para conservar el caudal, luego un aumento en la velocidad del flujo implica un aumento de los esfuerzos de corte en la zona, lo cual provoca esta socavación de lecho y transporte de arenas.

Por otro lado, a menos que se socave el lecho, la infiltración o transporte de concentrado de cobre en el lecho del canal no cambia. Esto es posible de apreciar en el perfil de infiltración en las zonas sin socavación (Figura 5.5).



Figura 5.5: Estado final de la infiltración. Experiencia con compuerta

5.1.2 Experimento 2, arena 7

En este experimento para evitar la socavación del lecho se implementó una placa anti socavación la cual consiste en una capa delgada de acrílico con gravas adheridas a sus dos caras. Se implementa de tal manera que no modifique el régimen del flujo, sin embargo, afecta la infiltración de la zona de derrame.

5.1.3 Experimento 3, arena 6

Durante este experimento se modificó el largo de canal a dos metros rectos y se crearon nuevas secciones para el pesaje del lecho pasando de cuatro a siete secciones. Respecto al procesamiento de datos se tuvo problemas en el sentido que solo se contaban con filmaciones y no fotografías de alta calidad, lo que hizo mucho más cuidadoso el

tratamiento de las imágenes para obtener la profundidad de infiltración del concentrado de cobre en la porción de arena del lecho. En esta experiencia el Froude obtenido corresponde al de un flujo supercrítico

5.1.4 Experimento 4, arena 5

En este experimento la granulometría de la arena gruesa usada en la implementación del lecho permitió que la infiltración del concentrado de cobre llegara hasta el fondo del canal, por lo que datos estadísticos de la infiltración no son comparables al de otras experiencias. Además en esta experiencia no se ha logrado conseguir un régimen uniforme.

5.1.5 Experimento 5, 6 y 7

Este conjunto de experimentos cambió a la segunda pendiente que corresponde a 0,7%. Durante estas experiencias se buscaba saber si existe variación en la profundidad de infiltración al variar caudales usando la misma granulometría de arenas.

Para las experiencias 5 y 7 se usó arena 7 y se varió los caudales desde 1,82 l/s a 2,45 l/s. Mientras que en la experiencia 6 se usó arena 6 con un caudal de 1,82 l/s, y se comparó con los resultados de las experiencias 5 y 7.

En ninguna de las experiencias se tuvo problemas con la socavación, sin embargo los balances de masas por tramos no cerraron correctamente, por lo que el análisis de concentrado de cobre por tramo se basa en las granulometrías.

A continuación en la Tabla 5.1 se presenta el resumen de los parámetros hidráulicos de los experimentos desarrollados

Tabla 5.1: Parámetros hidráulicos de los experimentos

ID	Q[l/s]	i	h [m]	R _h [m]	F _r	R _e	u* [m/s]	Escurrimiento uniforme
Exp 1	0,61	0,047	0,026	0,018	0,43	3774,75	0.090	No
Exp 2	0,61	0,047	0,025	0,017	0,45	3812,50	0.089	Si
Exp 3	1,95	0,047	0,025	0,017	1,43	12187,50	0.089	Si
Exp 4	1,95	0,047	0,040	0,023	0,71	10263,16	0.103	No
Exp 5	1,82	0,007	0,052	0,027	0,45	8553,86	0.043	Si
Exp 6	1,82	0,007	0,052	0,027	0,45	8553,86	0.043	Si
Exp 7	2,45	0,007	0,060	0,029	0,45	10671,55	0.044	Si

5.2 Infiltración y variación de la granulometría de arenas

En el primer conjunto de experimentos se busca establecer una relación entre granulometría de lecho y profundidad de infiltración del concentrado de cobre. Por lo que la primera hipótesis a comprobar, es que, mientras más gruesa sea la granulometría del lecho, más profunda será la infiltración. Por lo tanto durante las experiencias se debe comprobar el fenómeno y además descubrir alguna relación empírica que permita extrapolar resultados a otras granulometrías.

Para esto se procesan las imágenes obtenidas de un mismo tramo usando la metodología explicada en la sección 4.4.

Se debe comentar que para el caso de arena 5, el concentrado de cobre ha alcanzado el fondo del canal por lo que los resultados estadísticos obtenidos de esta arena no son comparables a los resultados de las demás experiencias.

Tabla 5.2: Parámetros estadísticos de infiltración.

Experiencia	D50[mm]	Infiltración media [cm]	Desviación estándar	Infiltración Máxima [cm]	Infiltración Mínima [cm]
1 [Arena 8]	2,12	0,35	0,16	0,77	0,02
2 [Arena 7]	1,36	0,85	0,24	2,08	0,32
3 [Arena 6]	0,94	0,97	0,46	2,13	0,02
4 [Arena 5]	0,67	2,08	0,65	2,75	0,11

En valores medios se ve una diferencia apreciable en el alcance del concentrado de cobre dentro del lecho mixto, la arena 5 escapa notablemente de los valores obtenidos en las experiencias con arenas más finas alcanzando incluso el fondo del canal, por lo que la infiltración media de arena 5 está subestimada y no puede usarse en experiencias de variación de caudales.

Por otro lado la arena 8 registra una infiltración muy poco profunda, donde los máximos valores corresponden a infiltraciones facilitadas por la penetración de la grava en la arena. Por lo tanto para experiencias de variación de caudal se descarta trabajar con este tipo de granulometrías.

En la Figura 5.13 se ve a lo largo del tramo la distribución de la máxima infiltración el concentrado de cobre en el lecho mixto.

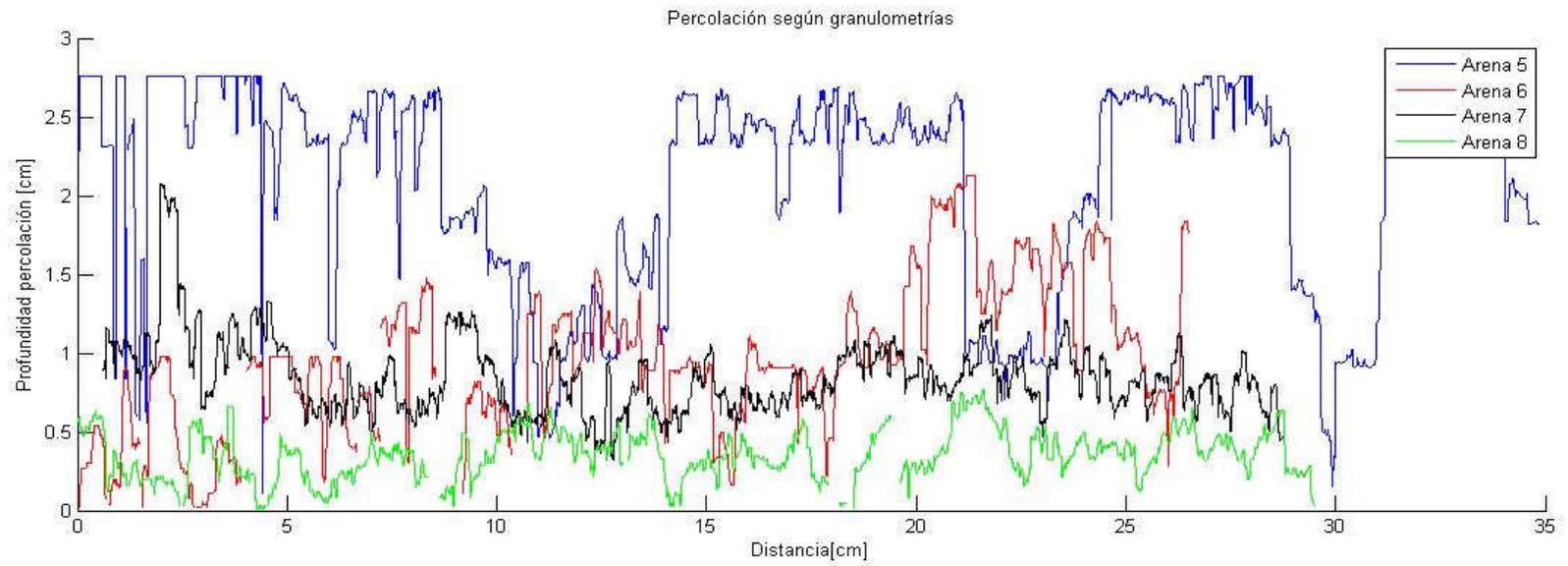


Figura 5.6: Infiltración de concentrado de cobre según cambios en la granulometría.

En el Figura 5.7 se pueden ver los diagramas de cajas de todos los experimentos donde se varió la granulometría.

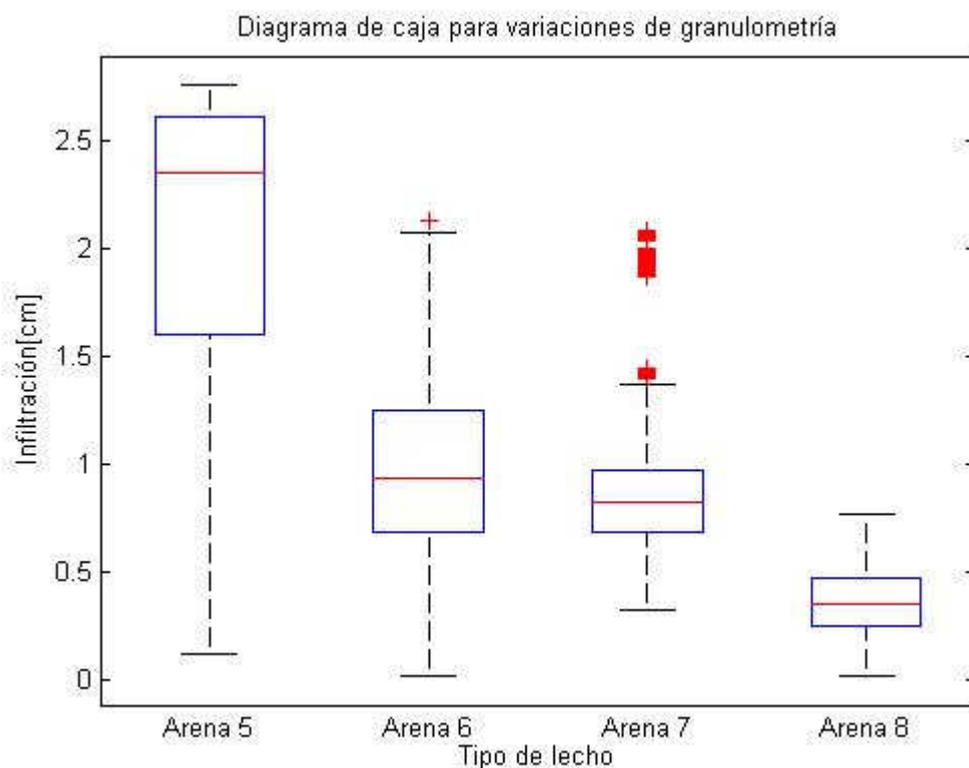


Figura 5.7: Diagrama de caja para variaciones de granulometría

La representación mediante diagramas de caja permite obtener rápidamente una apreciación ordenada de la estadística de las infiltraciones estudiadas en los experimentos, y así comentar tendencia de la infiltración ante la modificación de condiciones tales como cambios de granulometría de lecho o variaciones de caudales.

Se aprecia la tendencia a una disminución en la infiltración del concentrado de cobre en el lecho, a medida que el lecho se vuelve más fino (Arena 8); Esto se puede apreciar para la mediana de los valores y los valores máximos de la infiltración alcanzada que en el caso de la arena 5 debe tenerse en cuenta. La infiltración llegó al fondo del canal (infiltración de 3 cm bajo el lecho de arena).

Por otro lado se tiene valores atípicos en las gráficas, que corresponde principalmente a valores donde el concentrado de cobre alcanzó mayor profundidad en el lecho, debido a la disposición de las gravas sobre la arena. Esto crea canales que favorecen la infiltración del concentrado de cobre cuando las gravas no están en contacto directo con las arenas.

Los valores atípicos son retirados para visualizar como queda la estadística de los datos, pero nuevamente aparecen valores atípicos, cada vez más cercanos a los valores que se encuentran en las cajas, por lo que se decide trabajar con los conjuntos de datos obtenidos originalmente, sin embargo, el trabajo se desarrolla sabiendo de fenómenos de facilitación de infiltración de arenas y gravas, el que consiste en que fronteras de granos gruesos como

la grava facilitan un canal mayormente continuo al estar cerca de granos más finos como las arenas, situación que no se da en zonas de granulometría homogénea, en que los canales de infiltración son discontinuos.

5.3 Infiltración y variación de caudales

De las experiencias de infiltración y variación de granulometría se concluyó que la granulometría de la arena 8 es demasiado fina y no permitía una infiltración apreciable en el lecho, por el otro lado, la granulometría de la arena 5, muestra que el concentrado de cobre alcanza el fondo del canal por lo que no se puede estimar una máxima profundidad de infiltración.

Los resultados de infiltración hacen que se escojan las arenas 6 y 7 para estudiar su comportamiento ante la variación de caudales. En estas experiencias se aseguró una distancia focal fija de la cámara DSLR al canal, a través del lente y de una baranda fija a una distancia constante del canal.

El estado final después de cada derrame de concentrado de cobre fue fotografiado a través de los tramos especificados en la Tabla 3.1, durante el largo de la baranda.

5.3.1 Arena 7

Según el resumen de la Tabla 5.1 la pendiente de la configuración fue del 0,7% y los caudales se hicieron variar desde 1,82 l/s a 2,45 l/s obteniéndose los resultados de la infiltración a lo largo del canal que se presentan en las Figuras 5.8 a la 5.10.

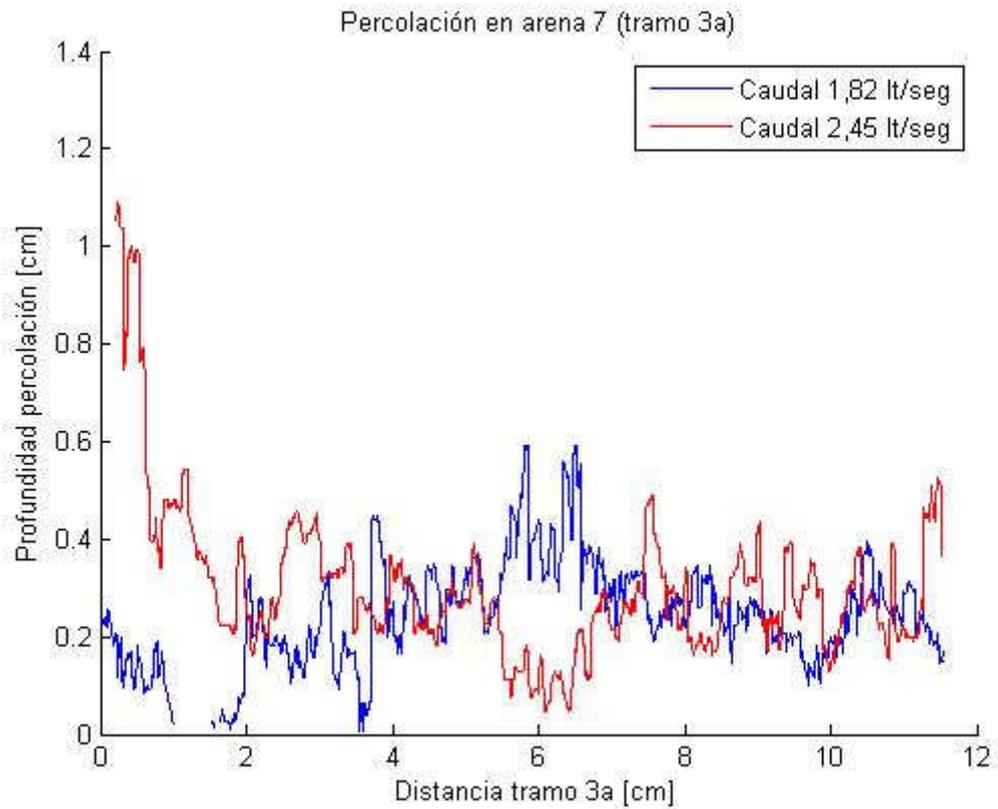


Figura 5.8: Infiltración tramo 3ª arena 7.

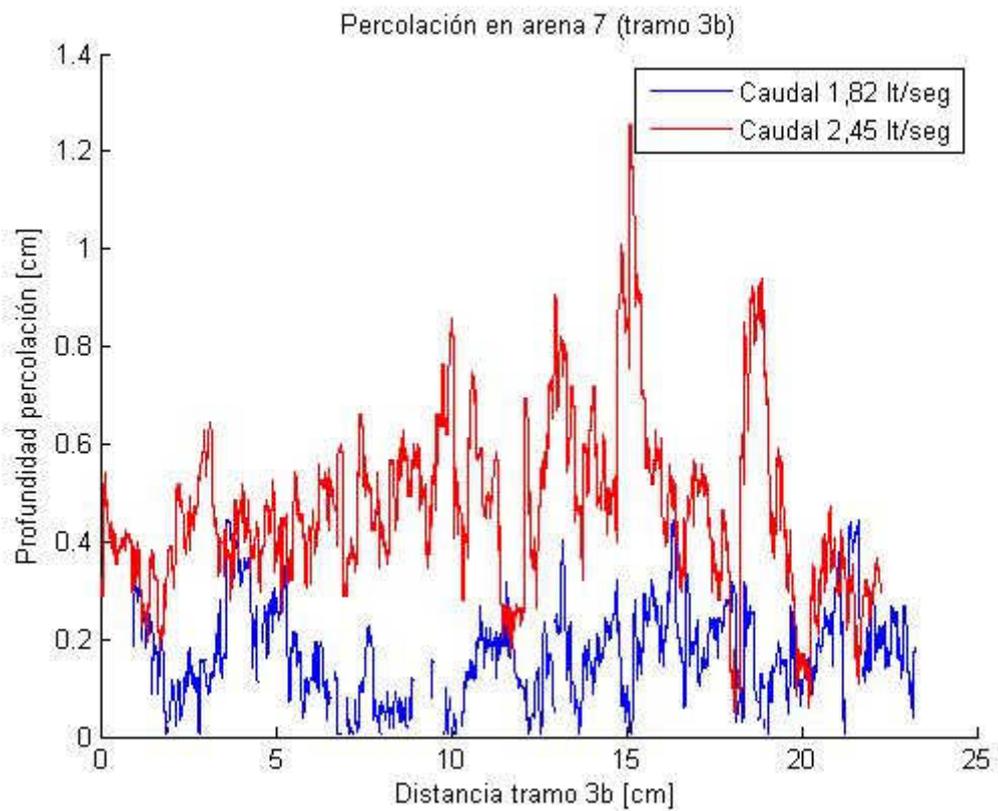


Figura 5.9: Infiltración tramo 3b arena 7

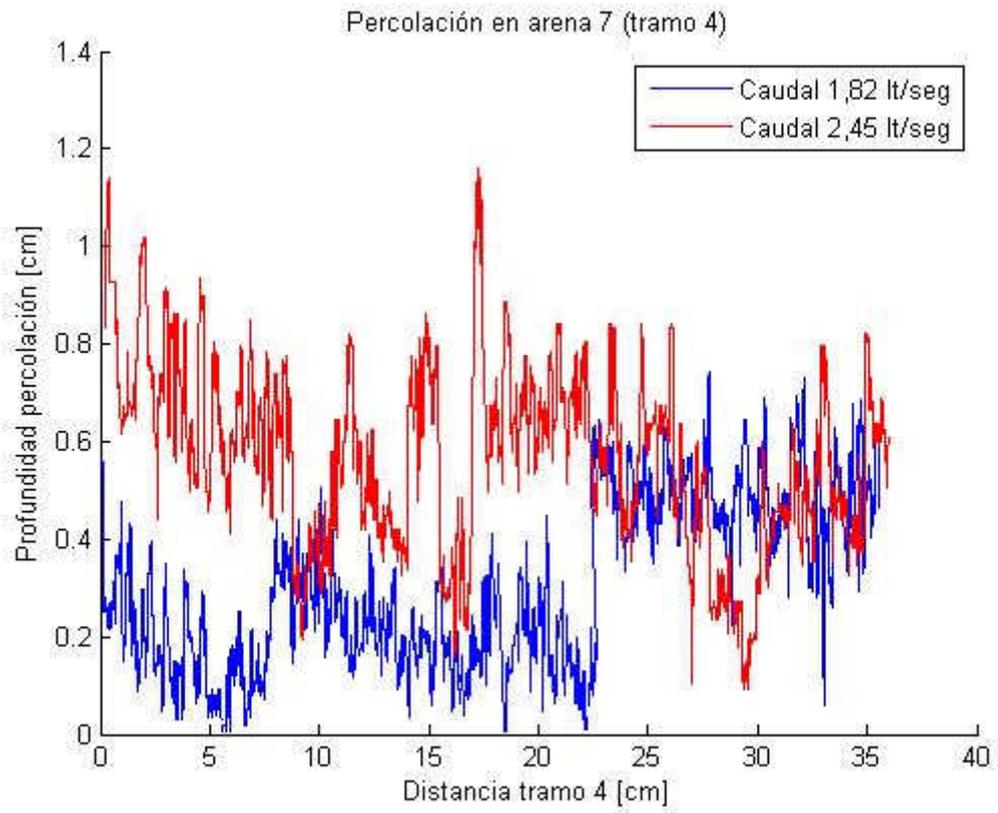


Figura 5.10: Infiltración tramo 4 arena 7

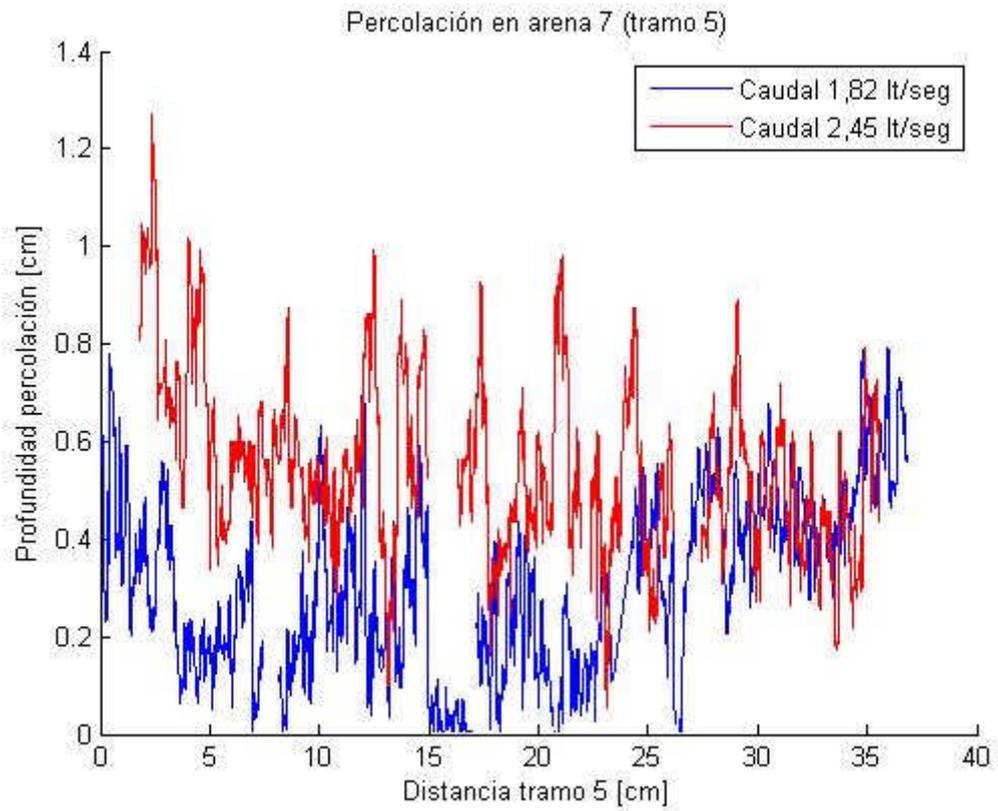


Figura 5.11: Infiltración tramo 5 arena 7

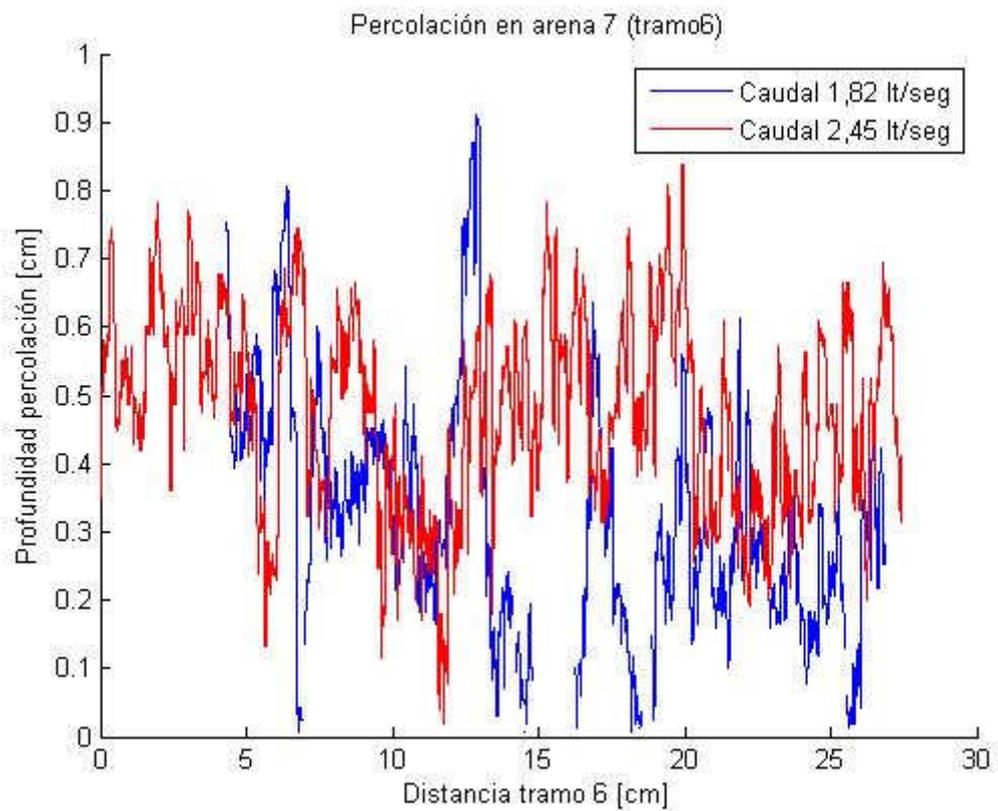


Figura 5.12: Infiltración tramo 6 arena 7

Tabla 5.3: Infiltración experiencia 5, arena 7, caudal 1,82 l/s

ID Tramo	Infiltración media [cm]	Desviación estándar	Infiltración Máxima [cm]	Infiltración Mínima [cm]
3 ^a	0.2488	0.1054	0.5904	0.0053
3b	0.1761	0.0948	0.4444	0.0058
4	0.3156	0.1723	0.7414	0.0058
5	0.3177	0.1730	0.7941	0.0056
6	0.3232	0.1731	0.9118	0.0059

Tabla 5.4: Infiltración experiencia 7, arena 7, caudal 2,45 l/s

ID Tramo	Infiltración media [cm]	Desviación estándar	Infiltración Máxima [cm]	Infiltración Mínima [cm]
3 ^a	0.3032	0.1610	1.0916	0.0458
3b	0.4706	0.1792	1.2542	0.0508
4	0.5698	0.1874	1.1589	0.0935
5	0.5482	0.1842	1.2727	0.0545
6	0.4764	0.1431	0.8381	0.0190

Los resultados presentados en las Tablas 5.3-5.4 y las Figuras 5.8-5.12, lo primero que se debe concluir es que un aumento en los caudales tendrá por consecuencia una infiltración más profunda del concentrado de cobre en el lecho de arenas, sin embargo, la irregularidad con la que el concentrado de cobre se infiltra en el lecho depende de la configuración de las gravas del estrato superior del lecho; Se pudo apreciar en las fotografías que zonas donde el concentrado de cobre llegó menos profundo corresponde a zonas donde las gravas tienen contacto directo con las arenas. Sin embargo, zonas donde existe una distancia más profunda entre las gravas y el inicio del lecho de arena, presentan infiltraciones más profundas.

Se registraron secciones las cuales no presentan infiltración, esto es representado en las gráficas mediante un valor NaN, para no alterar valores estadístico calculados y representados.

A continuación se presentan los diagramas de caja para el canal en los tramos analizados con el objetivo de encontrar tendencias en la distribución del concentrado de cobre desde el derrame y durante el largo de su transporte en el canal.

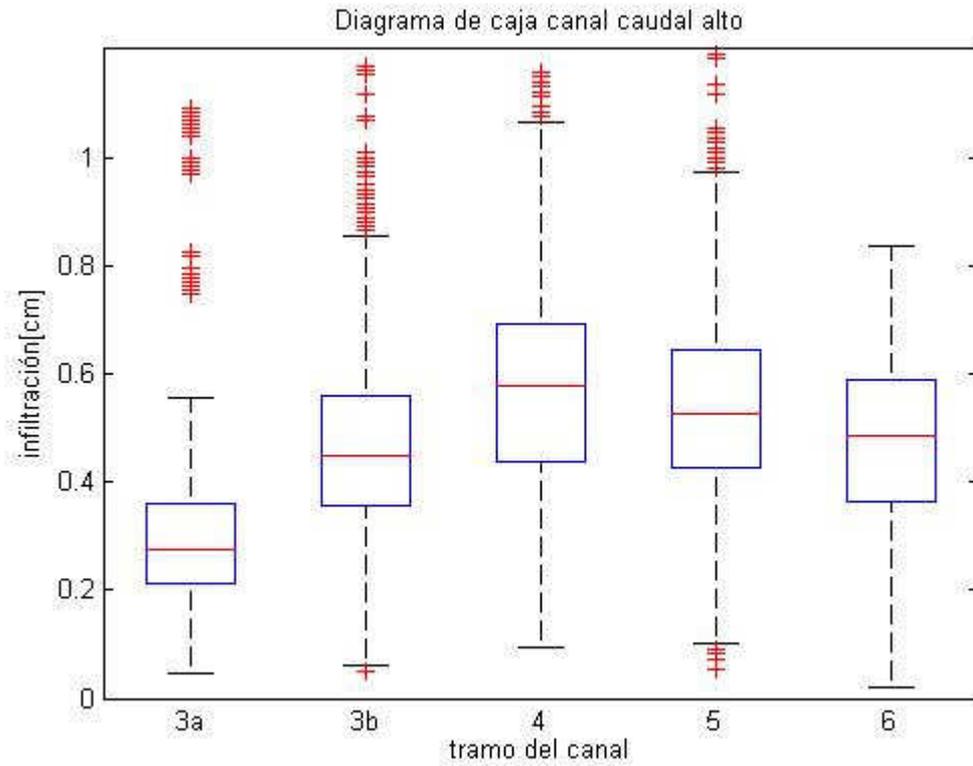


Figura 5.13: Diagrama de caja canal completo para caudal 2,45 l/s

Para caudales de 2,45 l/s en el tramo 3a, se ve una diferencia en la tendencia de comportamiento, la cual puede deberse principalmente a fenómenos del momentum del derrame y el cambio de sección del canal. Una vez el flujo alcanza la uniformidad se puede ver que la profundidad de la infiltración tiende a estabilizarse levemente bajar.

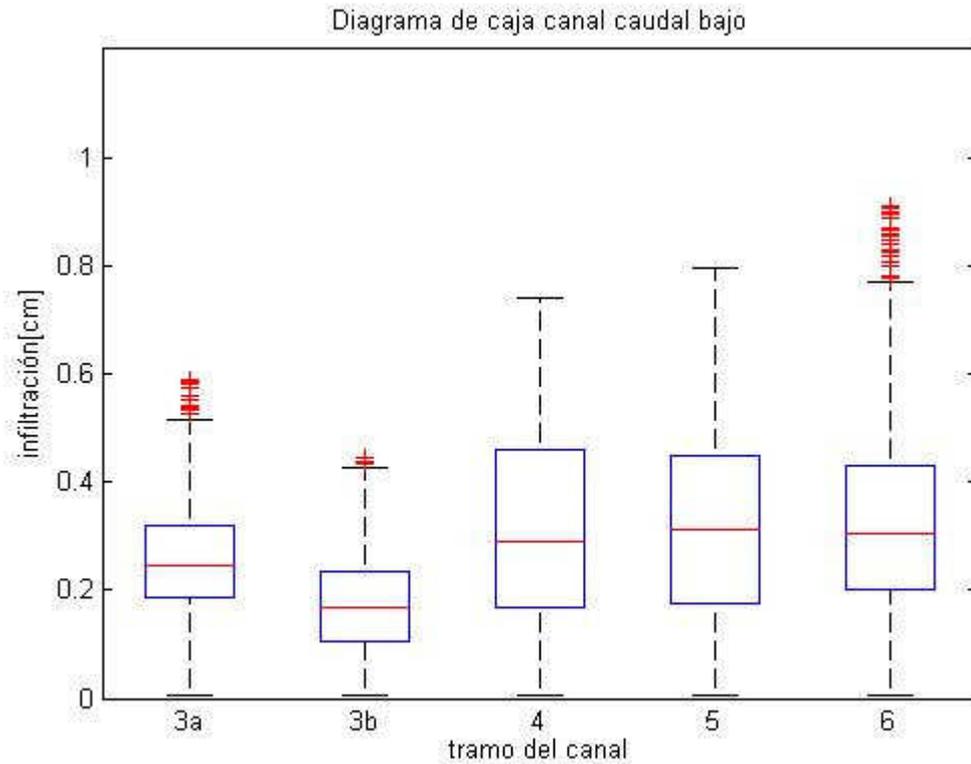


Figura 5.14: Diagrama de caja canal completo para caudal bajo 1,82 l/s

El comportamiento en caudales altos (2,45 l/s) se repite también en caudales bajos (1,82 l/s), sin embargo, en caudales bajos se logra una infiltración menor, lo que podría hacer pensar que los esfuerzos de corte guardan relación con la infiltración alcanzada del concentrado de cobre en el lecho. Para comprobarlo se estudiará mediante la técnica PIV los caudales pasantes y los esfuerzos de corte generados por estos caudales en el flujo para el tramo 6.

5.4 Relaciones tipo Gibson para infiltración del concentrado de cobre

Durante el ajuste de los experimentos definitivos y la elección de granulometrías de arena para implementación de lechos mixtos se estableció que las relaciones que propuso Gibson para la infiltración de arenas finas no era completamente válidas para el caso del concentrado de cobre, es por esto que mediante los mismo adimensionales propuestos en su investigación, se dará un rango para los fenómenos de formación de puentes e infiltración sin impedimentos, se puede establecer por las imágenes analizadas que la infiltración del concentrado de cobre en el estrato de arena del lecho mixto se da solo para arena 6 y 7, obteniendo en la arena 8 una formación de puentes de concentrado de cobre en las fronteras de los granos de arena que provoca la acumulación de concentrado de cobre en el estrato de gravas. Por lo otro lado, en la arena 5 la infiltración ha llegado hasta el fondo del canal, si bien, no se sabe si un estrato de arena de mayor espesor de arena 5

se alcanzará un límite de infiltración se asumirá que para la arena 5 hay infiltración sin impedimento por lo que el adimensional

$$\text{Adimensional de infiltración} = \frac{D_{16 \text{ arena}}}{D_{85 \text{ Concentrado de cobre}}}$$

En el Anexo A.6. se puede encontrar los detalles de la curva granulométrica característica del concentrado de cobre, interpolando linealmente los puntos cercanos al D85, se tiene que el D85 tiene un tamaño de 54.68 μm , es decir, 0.05468 mm

Tabla 5.5: Caracterización del adimensional de infiltración para el concentrado de cobre sobre estratos de arena

Arena	D16 [mm]	$D_{16 \text{ arena}}$	Fenómeno
		$D_{85 \text{ Concentrado de cobre}}$	
5	1,46	26,70	Infiltración sin impedimentos
6	1,10	20,12	
7	0,7	12,80	
8	0,5	9,14	Formación de puentes en interfaz

Cabe destacar que para todo adimensional de infiltración menor a 26,7 se tendrá formación de puentes, sin embargo la condición Adimensional de infiltración < 9,14, será la que formara puentes en la interfaz arena grava e impedirá la infiltración de concentrado de cobre en el estrato de arena del lecho mixto.

5.5 Perfiles de velocidad

Los perfiles de velocidad adimensional u/u^* donde u corresponde a la velocidad media del flujo en el plano central, mientras que u^* corresponde a la velocidad de corte del flujo determinada a partir de la expresión 2.17 se grafican con la distancia del fondo (y/h) (posición respecto al fondo).

De la Figura 5.15 se puede ver los perfiles de velocidad adimensional en rojo para un caudal de 1,82 l/s, mientras que en negro para un caudal de 2,45 l/s, la diferencia entre ambos perfiles no presenta gran diferencia debido a que los caudales varían solo en un 35%.

En la Figura 5.15 se ve que las dos curvas representadas por el cuadrado y rombo de cada par de gráficos, diferencian las situaciones antes y después del derrame respectivamente, donde se aprecia una muy leve diferencia entre la situación antes y después del derrame, siendo menor la velocidad del flujo en la situación después del derrame, debido a un cambio en la rugosidad en el lecho producida por el derrame.

Para el caudal de 1,82 l/s la diferencia media de la velocidad adimensional después del derrame respecto a antes del derrame fue de una el 0.46% menor, mientras que la diferencia media de la velocidad adimensional para un caudal pasante de 2,45 l/s fue de

1, 24% menor respecto a la velocidad adimensional antes del derrame de concentrado de cobre. Por lo tanto la primera impresión hace pensar que un aumento en los caudales genera diferencias más notorias en la disminución de la velocidad del flujo.

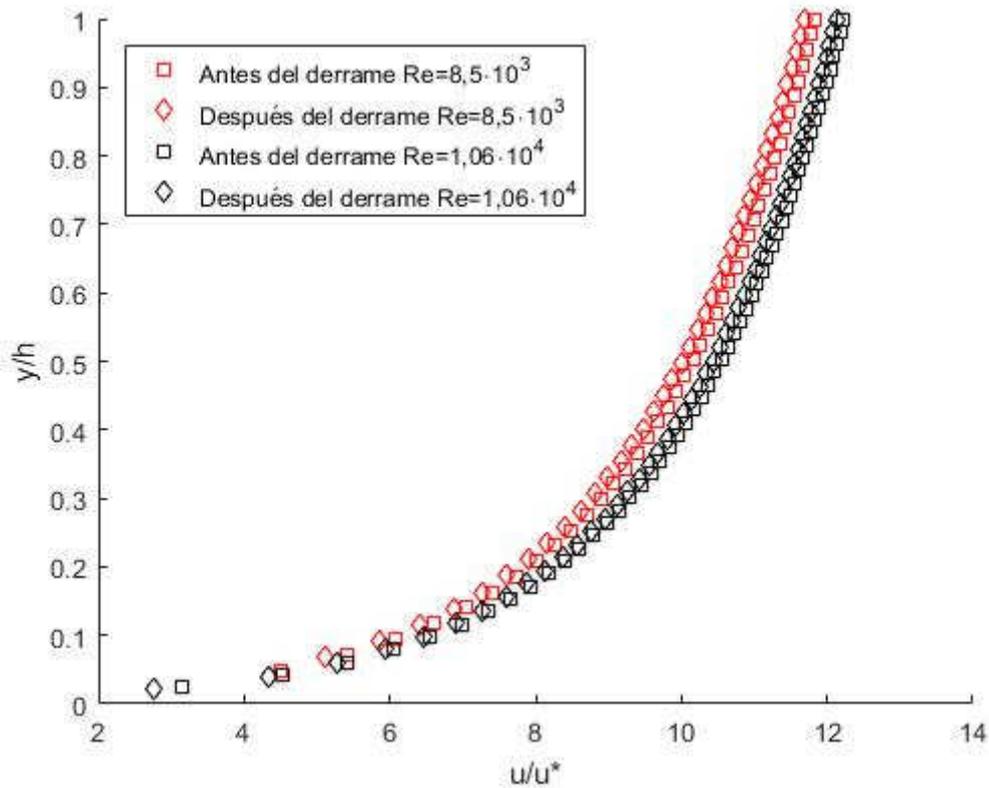


Figura 5.15: Perfil de velocidad para caudales 1,82 l/s y 2,45 l/s antes y después del derrame de concentrado de cobre.

5.6 Esfuerzos de corte PIV

El esfuerzo de corte total está compuesto de tres términos como se explicó en la ecuación 2.11. Estos términos corresponden al esfuerzo de corte laminar o viscoso, esfuerzo de corte turbulento o de Reynolds, y esfuerzo de corte espacial o de forma.

$$\tau_{total} = \tau_v + \tau_{tur} + \tau_{esp}$$

$$\tau_{total} = \mu \frac{d\langle \bar{u} \rangle}{dy} - \rho \overline{\langle u'v' \rangle} - \rho \langle \tilde{u}\tilde{v} \rangle$$

El esfuerzo de corte laminar o viscoso está asociado a la capa límite en un lecho completamente liso, al tener un lecho rugoso, la capa límite es rota y los efectos sobre el esfuerzo de corte total son prácticamente nulos (Nikora et al, 2001), en las experiencias presentadas los valores alcanzados son cercanos 10^{-33} (esfuerzo de corte laminar adimensionalizado), en toda la lámina de agua, por lo que no se distinguieron

diferencias entre situaciones con derrame de concentrado de cobre ni cambio de caudales.

El esfuerzo de corte espacial, muestra los efectos de la rugosidad del lecho sobre el flujo, dado esto se espera que el esfuerzo deje de ser nulo en las proximidades del lecho, sin embargo en la totalidad de la lámina de agua se ven esfuerzos nulos, para los cambios de caudal y derrames.

El esfuerzo de corte turbulento representa los efectos de la turbulencia sobre el flujo y representa prácticamente la totalidad del esfuerzo de corte. El esfuerzo de corte se desarrolla linealmente en la lámina de agua desde la superficie ($y/h=0,8-0,9$) hasta llegar a máximos, ubicados a un y/h de 0,2. Luego de esto comienza a disminuir debido a mecanismo de extracción de momento por parte del lecho (Czernuszenko, 2011).

Para este estudio se ha prestado especial atención a los resultados obtenidos para los esfuerzo de corte turbulento, y se han adimensionalizado por $\rho g R D_s$ con $D_s = D_{50grava} = 10 \text{ mm}$

$$\tau_{turb}^* = \frac{-\rho \langle u'v' \rangle}{\rho g R D_s}$$

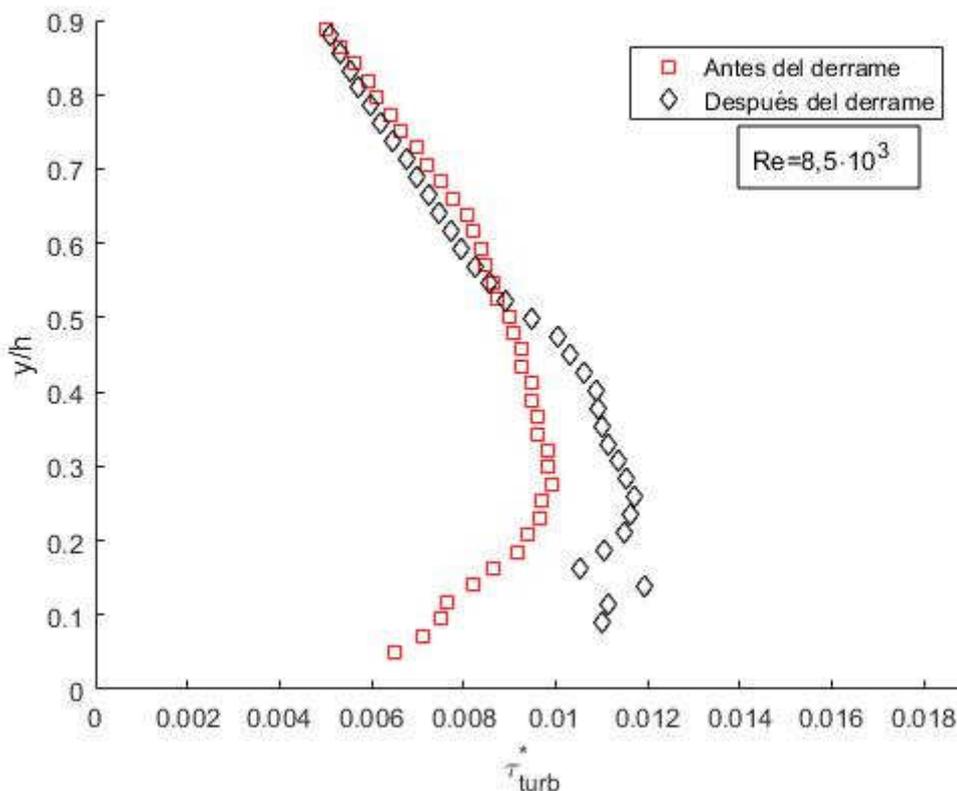


Figura 5.16: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 1,82 l/s

De la Figura 5.16 se puede desprender que el esfuerzo de corte para la situación antes del derrame y después del derrame es prácticamente el mismo en el tramo perteneciente a la

subcapa logarítmica, y que desde donde el esfuerzo de corte es máximo (aproximadamente $y/h=0.2$, hacia abajo), el esfuerzo después del derrame muestra ser mayor. Esto podría deberse a que las partículas de concentrado de cobre depositadas en el lecho, modifican la rugosidad de este y con su masa aportan momentum con la velocidad del flujo para movilizar partículas de lecho (concentrado de cobre, gravas y/o arenas), sin embargo concluir esto es apresurado y se deben realizar más experimentaciones para aclarar esta teoría.

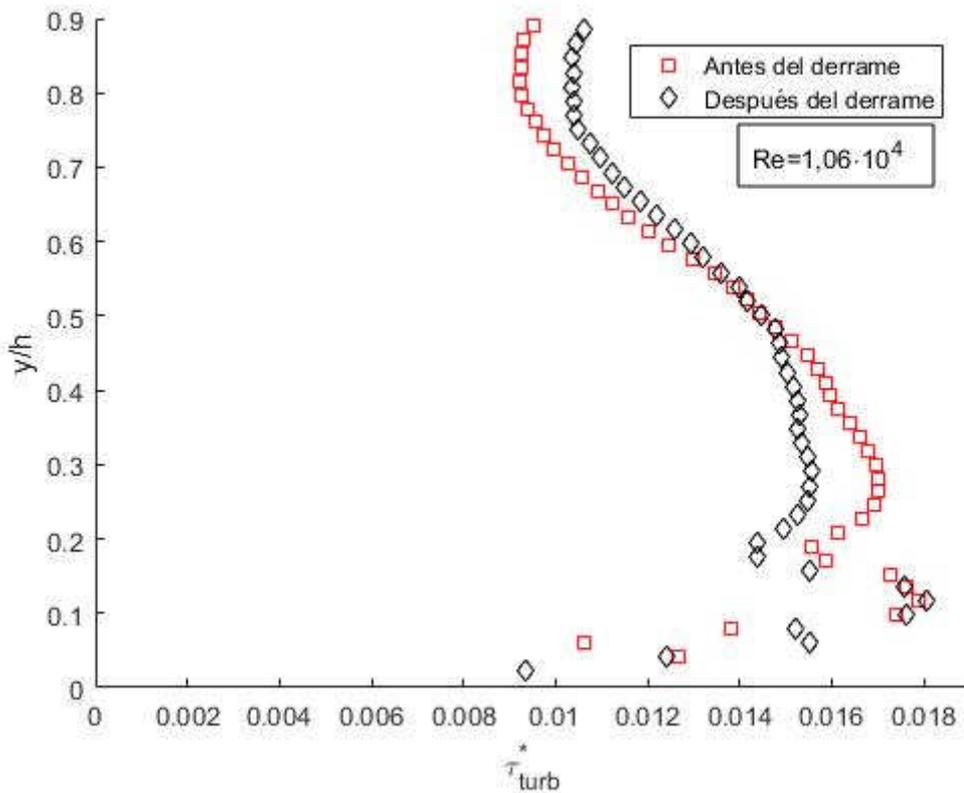


Figura 5.17: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 2,45 l/s

En la Figura 5.17, para la subcapa logarítmica, se tiene un comportamiento muy similar al de la Figura 5.16, sin embargo, para la subcapa rugosa (donde el tope de la capa está dado por el máximo valor del esfuerzo de corte), se tiene un comportamiento opuesto al de la Figura 5.16 con valores más cercanos entre sí.

La zona de la subcapa rugosa es tremendamente difícil de medir dadas las reflexiones del láser sobre el lecho. Más aún después de derramar el concentrado de cobre, el cual es opaco y dificulta la detección de la rodamina. La instalación no es lo suficientemente grande para probar otros caudales y estudiar diferencias significativas, por lo que se recomienda repetir experiencias con caudales similares para corroborar resultados y conclusiones de estas Figuras.

En la Figura 5.18 se muestran los τ_{turb}^* generados en el plano más cercano a una pared del canal y se compara la situación antes del derrame y post derrame de concentrado cobre.

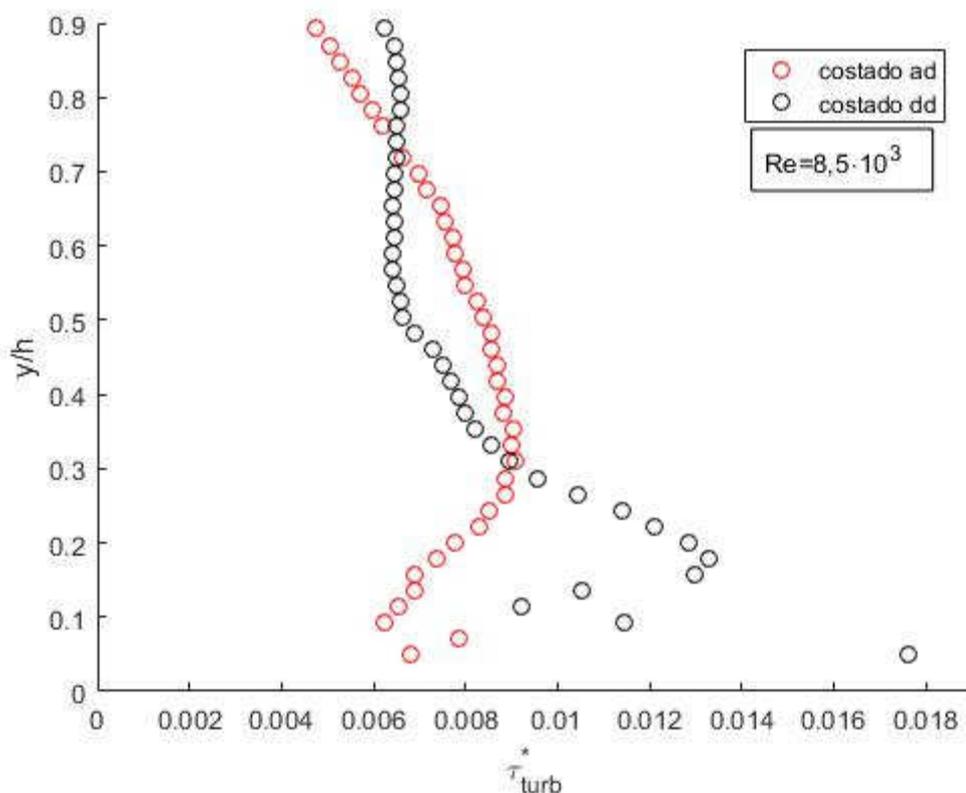


Figura 5.18: Esfuerzo de corte turbulento adimensional para caudal 1,82 l/s en costado de canal

La Figura 5.18, muestra nuevamente altos esfuerzos de corte para la situación posterior al derrame lo cual hace pensar que el concentrado de cobre aumenta la resistencia hidráulica del lecho.

Además se tiene que los esfuerzos mostrados en la Figura 5.18 se pueden comparar con los de la Figura 5.16 que están tomados bajo un mismo caudal, pero en el centro del canal. Ante esta situación se registra un mayor esfuerzo de corte en la zona central del escurrimiento.

5.7 Comparación esfuerzo de corte PIV y logarítmico

En la Figura 5.19 se tiene una correlación entre los esfuerzos de corte obtenidos por la técnica PIV y la expresión logarítmica, una relación lineal entre las 4 experiencias (dos caudales diferentes), presenta un error aproximado del 10 %.

El detalle de los esfuerzo de corte obtenidos a través de la relación logarítmica pueden ser vistos en el anexo A.5.

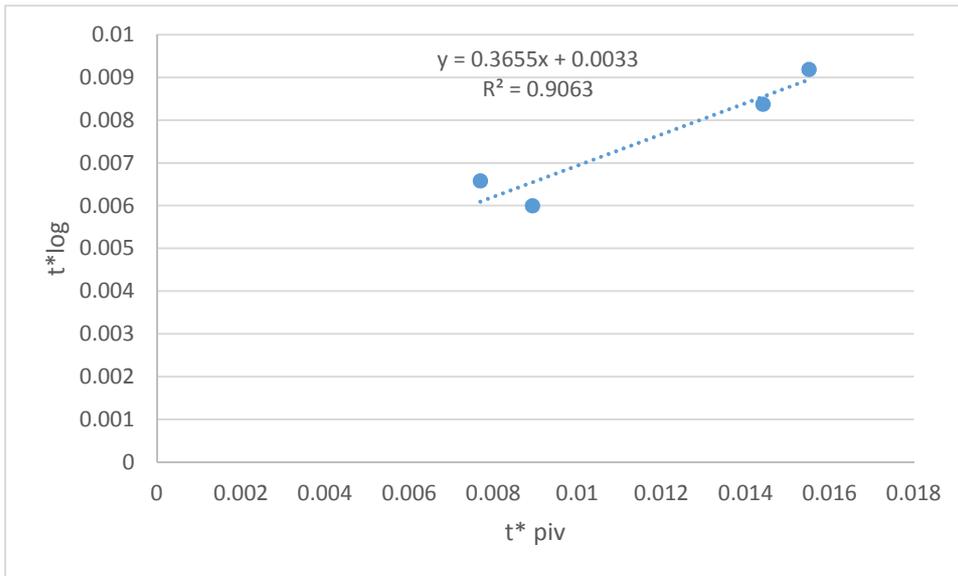


Figura 5.19: Comparación entre τ_{tur}^* proveniente del PIV y τ_{log}^* proveniente de la formula logarítmica.

5.8 Transporte de concentrado de cobre

El transporte del concentrado de cobre se pensaba consistía en dos procesos, uno el transporte en suspensión que luego se deposita e infiltra, y un transporte por gasto solido de fondo.

El último fenómeno fue descartado luego de la primera experiencia definitiva, dado que el perfil de la infiltración de concentrado de cobre no cambiara según lo visto en la sección 5.1.2 (Experimento 1 arena 8), en detalle las Figuras 5.1-5.5, después de haber modificado los esfuerzos del flujo a tal punto de movilizar las gravas.

Por lo tanto el transporte del concentrado de cobre es un problema de suspensión y de cuanto tomara que este llegue al fondo dependiendo de las condiciones del flujo.

Para determinar esto se establecieron dos metodologías, una consiste en pesar las diferencias de masa en los tramos de lecho antes y después de la experiencia. Mientras que la otra metodología consiste en hacer granulometrías a cada tramo del lecho y recolectar la mayor cantidad posible de concentrado de cobre.

El resumen del concentrado de cobre cuantificado en ambas metodologías se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.6: Resumen de peso (gr) de concentrado de cobre en fondo de canal por cada tramo.

Exp	Método	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Exp2	Método 1	44	13.5	263.5	718.5			
	Método 2							
Exp3	Método 1	4.6	-12.1*	208.4	225.2	310.7	-38*	199.7
	Método 2	14.5	204.3	124.1	125.2	74.4	75.1	121.5
Exp4	Método 1	11.8	615.51	127.6	485.8	149.2	196.1	80.3
	Método 2	0.2	312.8	151.1	100.5	74.4	79.2	92.7
Exp5	Método 1	14.2	159.4	606.3	328.5	294.5	157.5	187.7
	Método 2	16.8	313.6	400.2	322.1	278.8	196.7	145.6
Exp6	Método 1	11.2	222.6	376.4	193.6	349.5	242.5	215.2
	Método 2	6.8	155.1	306.5	277.6	269.1	204	204.4
Exp7	Método 1	-4.8	269.7	31.2	235	182.9	180.1	156.5
	Método 2	15.4	234.5	216.3	205.7	193.9	151.9	157

En la Tabla 5.5 se puede apreciar que existe gran diferencia entre las dos metodologías empleadas; La metodología 1 en especial arrojó pésimos resultados ya que en el balance muestra valores negativos al restar los lechos con concentrado de cobre y limpios. Valores negativos de esta resta indican que hubo transporte de lecho hacia otros tramos, principalmente se observó transporte de gravas debido a la poca gradualidad en el inicio de algunas experiencias. Se observó en algunos videos un leve transporte de arena cerca de la interfaz arena-grava. Finalmente se observó un poco de socavación en los extremos de la placa anti socavación, principalmente en la experiencia 3. Por lo tanto, la combinación de estos factores hace que la metodología 1 no sea confiable.

Dado el comportamiento de los resultados de la metodología 1, se procede a graficar los resultados para cada experimento ejecutados con la metodología 2, con el objetivo de visualizar la cantidad de concentrado depositado desde el lugar del derrame.

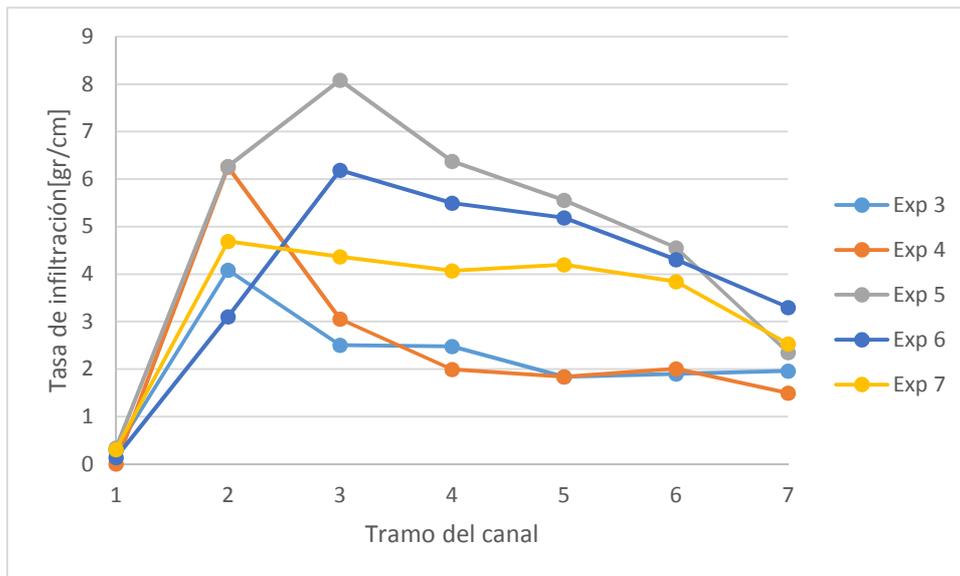


Figura 5.20: transporte concentrado de cobre debido a depositación de la suspensión

En la Figura 5.20 se ve que el tramo 1, que se ubica aguas arriba del derrame, prácticamente no recibe concentrado de cobre y lo poco que recibe se debe al momento del derrame sobre el flujo del canal, por otro lado la mayor cantidad de concentrado de cobre se ubica en el tramo 2 y 3 que son los tramos del derrame, e inmediatamente aguas abajo.

Se puede ver que en los experimentos 5 y 7, la diferencia observada en los tramos iniciales del canal corresponde a diferencias de peso de concentrado de cobre. Esta diferencia es provocada por los caudales pasantes, donde para el experimento 5 se tiene un caudal de 1,82 l/s mientras que para el experimento 7 se tiene un caudal de 2,45 l/s. Esto provoca que el caudal mayor impida un gran depósito de concentrado de cobre en el principio del canal, sin embargo, aguas abajo del tramo 3 la cantidad de concentrado de cobre acumulada por tramo tiene en ambos casos a disminuir y estabilizarse en un valor cercano a los 150 gr por tramo.

Por otro lado en el experimento 3 y 4 se varían la granulometría del lecho, siendo para el experimento 3 la arena 6 usada en el lecho, mientras que para el experimento 4 la arena 5, cabe recordar que la granulometría de arena 5 es más gruesa que la arena 6 y se vio una mayor profundidad de infiltración. Si bien el experimento 3 y 4 tiene condiciones de idénticas tanto de pendiente de fondo como de caudales se puede ver que la variación entre cantidad de concentrado de cobre aguas abajo del tramo 3 no es tan grande como para los experimentos donde se varió el caudal, además se puede apreciar una gran variación en el inicio del canal, y esto es por el hecho de que una vez ocurrido el derrame el concentrado de cobre, este tiene una gran facilidad de infiltrar en la arena 5, mientras que en la arena 6 que es un poco menos gruesa, el concentrado queda acumulado mayormente en la interfaz arena-grava y comienza a saturar el estrato de grava, impidiendo mayor infiltración de concentrado de cobre, esto provoca que todo el concentrado de cobre que podría acumularse sobre el estrato de grava, sea transportado en suspensión.

Finalmente todas las infiltraciones de los derrames en una distancia larga respecto al derrame tienden a estabilizarse en ciertos valores entre los 100 y 150 gramos por tramo.

5.9 Granulometrías de concentrado de cobre

El concentrado de cobre vertido durante el experimento, se transporta principalmente por suspensión a lo largo del canal. Durante este transporte en suspensión, parte del concentrado de cobre se deposita e infiltra en el lecho.

Con el fin de conocer alguna relación entre granulometrías de concentrado de cobre y nivel de depósito se procede a realizar distintas mediciones después de las experiencias.

La primera medición corresponde a estimar para cada experiencia el porcentaje representativo de transporte en suspensión y de depositación de concentrado de Cobre en cada experiencia esto se resume en la Tabla 5.6.

Tabla 5.7: Distribución de concentrado de cobre en cuanto a sedimentación y suspensión.

Id	Peso depositación	Peso suspensión	Peso no recuperado	Porcentaje depositación	Porcentaje suspensión	Porcentaje no recuperado
E2	1039.5	1389.9	570.6	34.65%	44.33%	19.02%
E3	739.1	1898.8	362.1	24.6%	63.3%	12.1%
E4	806.4	1866.5	327.1	26.9%	62.21%	10.9%
E5	1177.5	1091.5	731	39.3%	36.4%	24.3%
E6	1423.5	1213.1	363.4	47.5%	40.4%	12.1%
E7	1174.7	1556.6	268.7	39.2%	51.9%	8.9%

Desde la Tabla 5.6 se puede extraer que la proporción entre concentrado de cobre depositado y suspendido varía principalmente por cambios de pendientes. Variar la pendiente de 2.9% a 0.7% significa que el concentrado de cobre en suspensión pasa del 60% al 40% aproximadamente, esto debido a que, una fuerte pendiente involucra mayores velocidades del flujo.

Por otro lado se puede apreciar que variaciones en el caudal (experiencias Exp 5, 6 y 7) significarán variaciones en la cantidad de concentrado de cobre que se transporta en suspensión. En la Tabla 5.6 se puede ver que si se varía el caudal de 1,82 a 2,45 lt/seg la proporción de concentrado de cobre en suspensión aumenta desde 40 al 50% del total de concentrado de cobre vertido en el canal.

Por lo tanto aumentos de pendiente significaran que la contaminación por derrame es más fácilmente transportable aguas abajo, lo cual es un factor muy importante en ríos de

montaña. Por otro lado aumentos de caudales generan el mismo efecto, lo cual es importante en temporadas de deshielos en ríos de montaña.

El segundo análisis realizado compara las características granulométricas del concentrado de cobre en suspensión y el infiltrado, a través de curvas granulométricas. Estos análisis son posibles gracias a la colaboración del laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología, con un granulómetro laser se procedió con las mediciones de los dos concentrados de cobre.

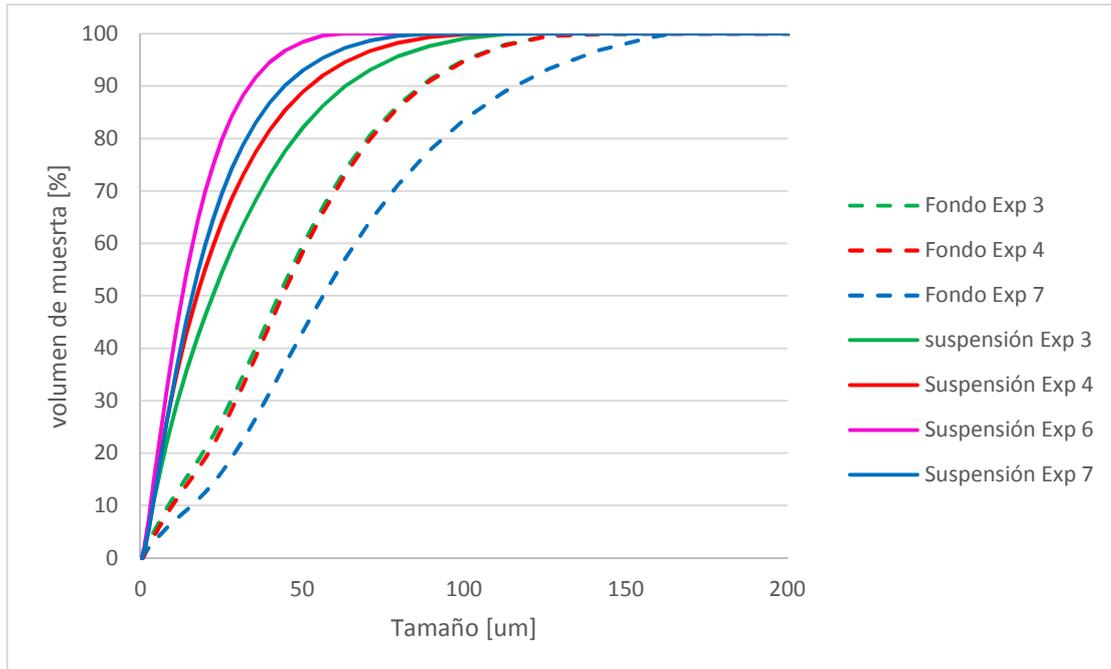


Figura 5.21: Comparación granulométrica de suspensiones y fondos de concentrado de cobre

Se puede ver que líneas punteadas representan finos que se recolectaron del fondo del lecho, mientras que líneas continuas representan finos transportados en suspensión.

Para los finos se ve que las granulometrías en suspensión se concentran en mayor parte en tamaños menores a 30 µm mientras que los finos de fondo están distribuidos más uniformemente alcanzando valores sobre los 100 µm.

Para las granulometrías de fondo, se puede comparar los experimentos 3 y 4 con el experimento 7, donde la infiltración de concentrado de cobre en cuanto a su granulometría, muestra una infiltración de partículas más finas para el caso de bajos caudales (exp 3 y 4, caudal 1,95 l/s), en el caso del experimento 7 la granulometría recuperada desde el fondo es más gruesa porque el caudal alto hace que las partículas más finas sigan suspendidas más tiempo.

Lo mismo se espera que ocurra con las granulometrías del concentrado de cobre en suspensión, lo cual se cumple si comparamos el experimento 6 (1,82 l/s) con el experimento 7 (2,45 l/s), sin embargo con el experimento 3 y 4 (1,95 l/s), se ve algo

inesperado y es que las suspensiones muestran una granulometría más gruesa que el resto de las experiencias.

Tabla 5.8: Resumen de diámetros característicos de concentrado de cobre en suspensión y fondo

ID	Tipo	d_{10}	d_{50}	d_{90}
E3	Fondo	9,768	43,827	87,153
E3	Suspensión	3,874	22,316	63,424
E4	Fondo	9,768	43,827	87,153
E4	Suspensión	3,472	17,47	52,251
E6	Suspensión	3,072	12,933	33,526
E7	Fondo	17,723	57,725	123,291
E7	Suspensión	3,810	15,968	44,571

El tercer y último análisis de finos corresponde a un análisis por tramo de los finos depositados, para esto se recolectó el concentrado de cobre de las granulometrías hechas a cada tramo y se separaron. Con este análisis se espera entender cómo influye el tamaño del grano en la distancia de depositación en el lecho desde su derrame. Este análisis fue implementado parcialmente en el experimento 6 y completamente implementado en el experimento 7

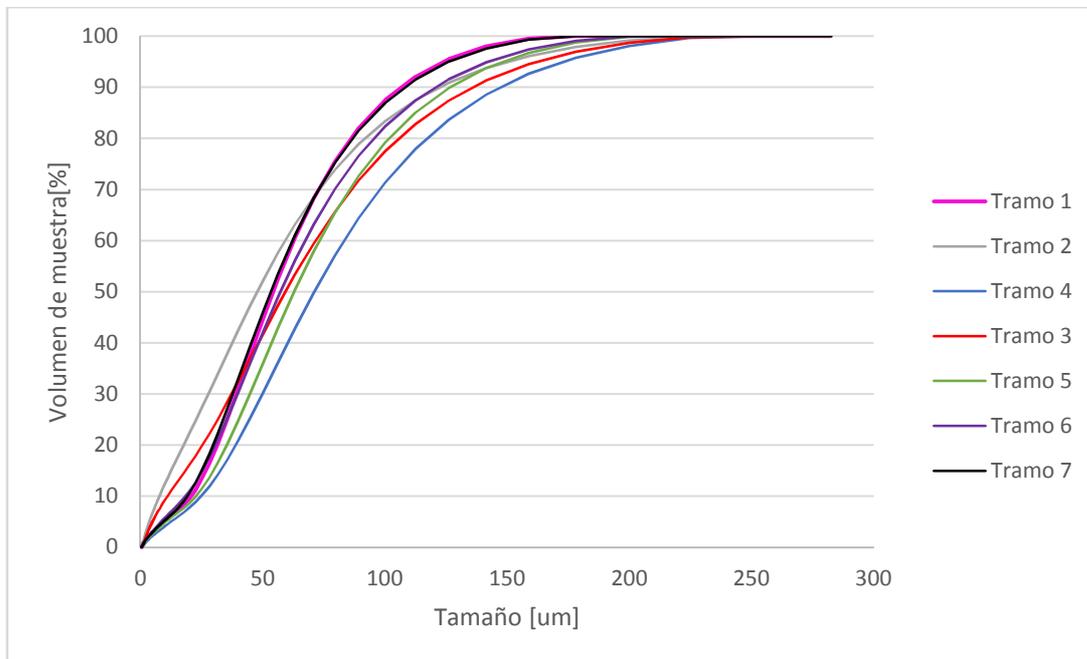


Figura 5.22: Curvas granulométricas de concentrado de cobre infiltrados en cada tramo del canal.

Tabla 5.9: Diámetros característicos de finos depositados en lechos

Tramo	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
1	20.721	54.203	106.425
2	7.752	47.777	122.239
3	11.029	59.297	135.734
4	24.827	71.126	146.962
5	22.674	62.896	126.741
6	18.398	57.284	120.458
7	19.241	53.318	108.077

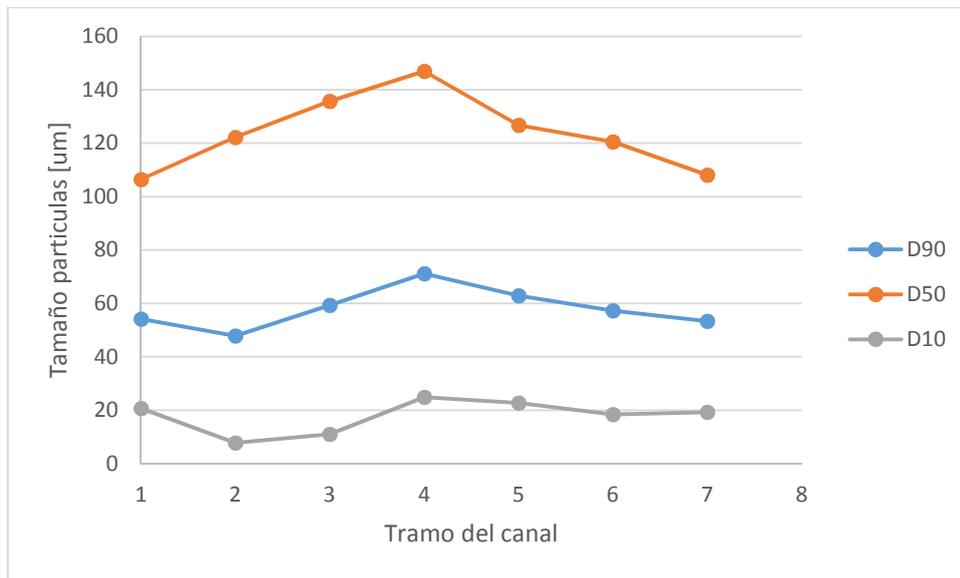


Figura 5.23: Tendencia de distribución de concentrado de cobre respecto a diámetros característicos de finos depositados en el lecho.

En primer lugar la diferencia de las granulometrías entre cada tramo es muy pequeña tal como se muestra en la Figura 5.22. Sin embargo al examinar diámetros característicos de las partículas de concentrado, se tiene que en los primeros tramos se tiene una granulometría muy variable, esto se podría deberse a turbulencias y corrientes secundarias originadas por el mismo derrame de concentrado de cobre y el cambio de sección del canal, sin embargo, para los tramos aguas abajo del Tramo 3 se obtiene una granulometría que disminuye gradualmente, afirmando la teoría de que mientras más fino sea el grano del concentrado de cobre más lejos podrá llegar en su transporte en suspensión, antes de depositarse.

6 Discusiones y conclusiones

6.1 Instalación experimental

La instalación experimental se fue modificando conforme avanzaban las experimentaciones, al evidenciar que el largo del canal no era lo suficientemente para desarrollar ejes hidráulicos ni garantizar uniformidad del flujo. Por esto, en experimentos con cambio de granulometría se tienen iguales condiciones de flujo, pero en arenas 5 y 6 fue posible estudiar la infiltración en más tramos que los experimentos con arena 7 y 8. Sin embargo, a la hora de comparar las cuatro experiencias solo es posible garantizar la del tramo 6 correspondiente a la configuración final (tramo 4 en configuración inicial), porque el angostamiento produce corrientes secundarias que afectan los tramos cercanos al derrame, esto quedo en evidencia al analizar la granulometría de fondo en cada tramo.

Respecto al uso de lechos mixtos (estrato de grava sobre estrato de arena), fue una buena alternativa a la hora de poder observar el fenómeno. Sin embargo, fue implementado usando la grava como una coraza, lo cual puede generar que una infiltración menos profunda que un lecho mixto que tenga granulometrías de grava en medio de la arena, porque se observó que cuando las gravas se introducían en la fracción de arena, favorecía los procesos de infiltración en el límite de las partículas.

Fenómenos de socavación fueron evitados mediante el uso de la placa antisocavación que no alteraba mayormente el régimen del flujo, sin embargo, no se pudo estudiar de qué manera afectaba la sedimentación del concentrado de cobre en los tramos 2 y 3. Por lo tanto resultados en estos tramos podrían estar alterados.

6.2 Metodología

Dentro de las técnicas para medir el transporte se estableció que en cada tramo de mediría la masa del lecho antes y después del derrame de concentrado de cobre, sin embargo a través de las granulometrías de cada tramo del lecho luego del derrame, se evidencio que no existía un balance de masa, debido al arrastre de arenas y gravas. Por esto la metodología de la variación de masa se reemplazó por las granulometrías de cada tramo.

Para realizar granulometrías en la estación de tamizado es necesario hacerlo de manera gradual, es decir, el tamiz debe ser llenado a menos de la mitad de su capacidad y tamizar al menos diez minutos, dado que luego de este tiempo las diferencias de concentrado de cobre recolectado bajo la malla #200 es marginal.

El procesamiento de los resultados fue de cuidado, dado que no todas las fotografías y videos tenían las mismas características de luminosidad, para dar un contraste más fuerte entre lecho con concentrado de cobre y limpio, la herramienta Lightroom fue muy útil para poder distinguir y establecer umbrales de estudio de infiltración.

6.3 Resultados

Cambios de granulometría fueron implementados en el primer set de experimento lo que resulto en que una granulometría de arena más gruesa favorecía una infiltración mayor en el lecho mixto, lo cual se pudo corroborar con las granulometrías hechas en cada tramo.

Respecto a las experiencias de cambios de caudales, fueron implementados con granulometrías fijas de arena, y se encontró que un mayor caudal generaba mayores infiltraciones para un mismo tipo de arenas, este fenómeno está relacionado con los esfuerzos de corte registrados para los dos caudales de las pruebas. Este resultado es interesante de analizar en mayor detalle, dado que ante un derrame variaciones diarias de caudales pueden hacer infiltrar el concentrado cobre en el lecho del río a una mayor profundidad por lo que una relación precisa podría ser de mayor utilidad a la hora de dimensionar las labores de remediación, sin embargo las dimensiones del canal usado no permitían variar más los caudales, dado que aumentar caudales implicaba el arrastre de la coraza de gravas.

Una vez derramado el concentrado de cobre la mayor parte de él se transporta en suspensión. En la instalación experimental en promedio el 50 % del concentrado de cobre viaja en suspensión hasta los estanques, pero también hubo un 20 % que no pudo recuperarse desde estanque I, por lo que una vez derramado el concentrado de cobre cerca del 70 % viaja en suspensión aguas abajo del derrame, mientras que el resto queda depositado cerca de la zona del derrame sin presentar un gasto solido que lo transporte por el fondo del lecho. El concentrado depositado en el lecho se percola y la única manera que vuelva a transportarse es que crecidas socaven el lecho del río y resuspendan el concentrado de cobre.

Existe una relación entre la granulometría de la arena y la infiltración del concentrado de cobre, lo que permite evaluar a través de la curva granulométrica de lechos si existe una posible infiltración de concentrado de cobre dentro del lecho y si esta es profunda o superficial, esto permite evaluar rápidamente lechos y zonas inundables expuestos a contaminación profunda.

Por último, según las granulometrías estudiadas en cada tramo, se establece que una vez el derrame se acopla con el régimen del flujo, la granulometría del concentrado de cobre que se deposita en el lecho, va disminuyendo según qué tan lejos de la zona de derrame se estudie el lecho (misma conclusión que Gibson et al. 2009), esto hace especular que podría haber una granulometría límite o asintótica, en la cual el concentrado de cobre no se depositará, mas seguirá en suspensión de manera indefinida. Esta especulación no se pudo comprobar dadas las características del canal, sin embargo, en un canal mucho más largo se podría tener una mejor comprensión del fenómeno.

7 Bibliografía

Ashida, K. and Michiue, M. (1972) Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams. *Proc. Japan Soc. Civ. Engng.*, Vol. 206, pp. 59-69.

Bagherimiyab, F. and Lemmin, U. (2013). Shear velocity estimates in rough-bed open-channel flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(14):1714-1724.

Bagnold, R. A. (1956) The flow of cohesionless grains in fluids. *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 249, pp. 235-297.

Beschta, R. L & Jackson W. L. (1979). The Intrusion of Fine Sediments into a Stable Gravel Bed, *J. Fish. Res. Board Can.* (36), 204–210.

Bird, G., Brewer, P.A., Macklin, M.G. (2010). Management of the Danube drainage basin: implications of contaminant-metal dispersal for the implementation of the EU Water Framework Directive. *Intl. J. River Basin Management* Vol. 8, No 1 (2010), pp 63-78

Czernuszenko, W. (2011). Spatially averaged log-law for flows over rough bed in zero- and nonzero-pressure gradient boundary layers. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 58(1-4):65-86.

Dennis, I.A., Coulthard, T.J., Brewer, P.A., Macklin, M.G. (2009) The role of floodplains in attenuating contaminated sediment fluxes in formerly mined drainage basins. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp. 453-466.

Diplas, P. and Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. *Dynamics of gravel-bed rivers*, pp 313-329.

Einstein, H.A. (1968) Deposition of suspended particles in a gravel bed. *J. Hydraul. Eng.*, 94, 1197–1205.

Engelund, F. and Fredsoe, J. (1976) A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nord. Hydrol.*, Vol. 7, pp. 293-306

Fernandez-Luque, R. and Van Beek, R. (1976) Erosion and transport of bed sediment. *J. Hydrol. Res.*, Vol: 14, pp. 127-144.

Finnigan, J. J. (1985). Turbulent transport in flexible plant canopies. The forest-atmosphere interactions, B. A. Hutchinson and B. B. Hicks, eds., Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 443–480.

García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., and García, M. H. (2005). Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Gibson, S., Abraham, D., Heath, R., & Schoellhamer, D. (2009). Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework. *Sedimentology*, 56(3), 661–676.

Giménez-Curto, L. A. and Lera, M. A. C. (1996). Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 101(C9):20745–20758.

Izakson, A. (1937). Formula for the velocity distribution near a wall. *J. Experimental and Theoretical Phys. (Zh. Eksp. Teor. Fiz.)*, 7, 919–924 (in Russian).

Iseya, F. and Ikeda, H. (2014). Pulsations in bedload transport induced by a longitudinal sediment sorting; a flume study using sand and gravel mixture, *Geografiska Annaler*, 69(1), 15–27.

Macklin, M.G., Brewer, P.A., Hudson-Edwards, K.A., Bird, G., Coulthard, T.J., Dennis, I.A., Lechler, P.J., Miller, J.R. and Turner, J.N. A. (2006) A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology* 79, pp. 423–447.

Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport.

Mori, N., Suzuki, T., and Kakuno, S. (2007). Noise of acoustic doppler velocimeter data in bubbly flows. *Journal of engineering mechanics*.

Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., and Griffiths G. (2001). “Spatially averaged open-channel flow over rough bed”. *J. Hydraul. Eng.*, 2001, 127(2): 123-133

Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., and Dittrich, A. (2004). Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10):1036-1042.

Niño, Y. and García, M. (1998). Using lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling. *Hydrological Processes*, 12(8):1197-1218.

Niño, Y., García, M., and Ayala, L. (1994). Gravel saltation: 1. experiments. *Water resources research*, 30(6):1907-1914.

Overbeek, J. Th. G., 1991. Stability of hydrophobic colloids and emulsions. In: *Colloid Science*, H. R. Kruyt ed., Elsevier, Amsterdam, 302-341.

Pope, N., Windows, J., and Brinsley, M. (2006). Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach, a comparison of annular flume and field data. *Continental Shelf Research*, 26(8):959-970.

Raupach, M. R., and Shaw, R. H. (1982). Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 22, 79–90.

Smith, J. D., and McLean, S. R. (1977). Spatially averaged flow over a wavy surface. *J. Geophys. Res.*, 83(12), 1735–1746.

Taki, K. (2001). Critical shear stress for cohesive sediment transport. Department of Civil Engineering Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, 275-8588, Japan.

Wilson, N. R., and Shaw, R. H. (1977). A higher order closure model for canopy flow. *J. Appl. Meteorology*, 16, 1197–1

Wren, D., Langendoen, E., and Kuhnle, R. (2011). Effects of sand addition on turbulent flow over an immobile gravel bed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*.

8 Anexos

A.1. Deducción de ecuación para diseño de dosificador de concentrado de cobre

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_e - Q_s$$

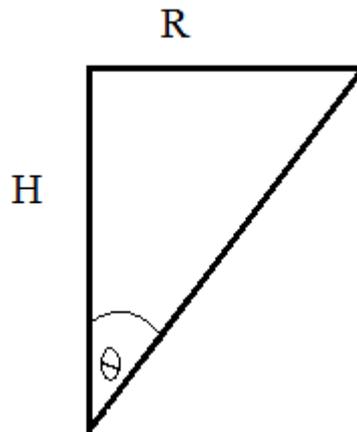
$$Q_s = -A\sqrt{2gH(t)}$$

A: Área del orificio de drenaje [cm^2]

g: Aceleración de gravedad [cm/s^2]

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial(\pi R^2 \left(\frac{H(t)}{3}\right))}{\partial t}$$

A': Área de recipiente



Donde

$$R = H \tan\theta$$

Reemplazando en balance de volumen

$$\frac{\partial \pi \tan(\theta)^2 \left(\frac{H(t)^3}{3}\right)}{\partial t} = -A\sqrt{2gH(t)}$$

$$\frac{\pi \tan(\theta)^2}{3A\sqrt{2g}} \frac{\partial H(t)^3}{\partial t} = -\sqrt{H(t)}$$

$$\frac{\pi \tan(\theta)^2}{3A\sqrt{2g}} \int \frac{\partial H(t)^3}{\sqrt{H(t)}} = - \int \partial t$$

$$\frac{\pi \tan(\theta)^2}{3A\sqrt{2g}} \int_{H_0}^{H_f} \partial H(t)^{5/2} = - \int \partial t$$

Con $H_0 = H(t)$ y $H_f = 0$

$$\frac{2\pi \tan(\theta)^2}{21A\sqrt{2g}} H(t)^{7/2} = t$$

Volumen de pulpa de concentrado de cobre

$$\frac{P_{cu}}{4.2} + \frac{P_{h2o}}{1} = H(t)A'$$

P_{cu} : Masa de concentrado de cobre [kg]

P_{h2o} : Masa de agua [kg]

Proporción mezcla de pulpa (70% de concentrado de cobre en peso y 30% de agua en peso)

$$\frac{P_{cu}}{7} = \frac{P_{h2o}}{3}$$

$$V_{cu} + V_{h2o} = V$$

$$\frac{P_{cu}}{4.2} + \frac{3P_{cu}}{7} = \pi \tan(\theta)^2 \left(\frac{H(t)^3}{3} \right)$$

Reemplazando

$$\frac{19,6 P_{cu}}{29,4} = \pi \tan(\theta)^2 \left(\frac{H(t)^3}{3} \right)$$

Despejando $H(t)^3$

$$\frac{2 P_{cu}}{\pi \tan(\theta)^2} = H(t)^3$$

Reemplazando en la ecuación

$$\frac{2\pi \tan(\theta)^2}{21A\sqrt{2g}} \left(\frac{2 P_{cu}}{\pi \tan(\theta)^2} \right)^{7/6} = t$$

$$\frac{0.1347 P_{cu}}{A\sqrt{g}} \left(\frac{2 P_{cu}}{\pi \tan(\theta)^2} \right)^{1/6} = t$$

A.2. Curvas granulométricas del lecho

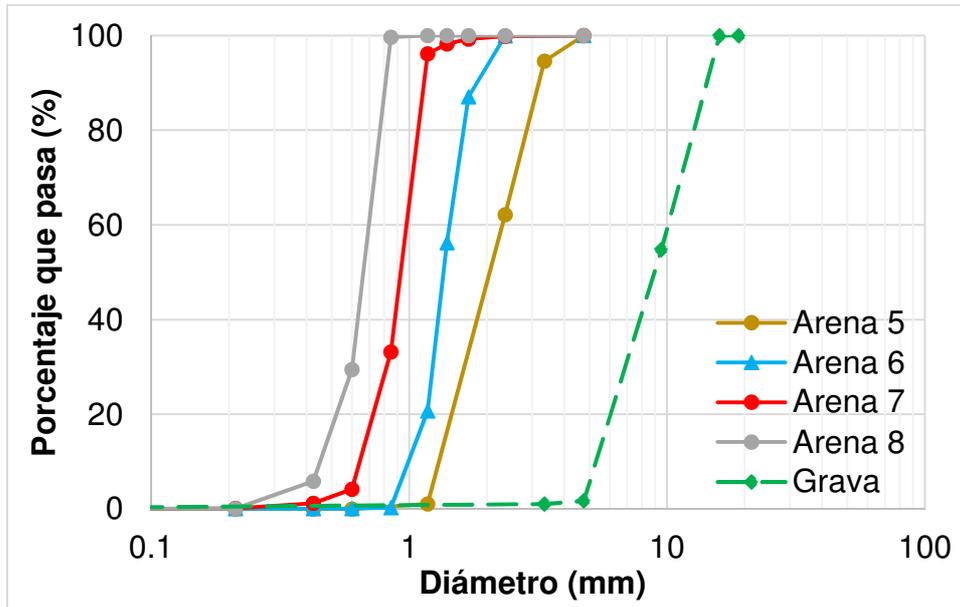


Figura 8.1: Curvas granulométricas arenas usadas en lecho

Tabla 8.1: Resumen material granular [mm]

Resumen material granular (mm)				
Tipo arena	d_{16}	d_{50}	d_{84}	d_{90}
Arena 5	1.46	2.12	3.03	3.20
Arena 6	1.10	1.36	1.67	1.85
Arena 7	0.70	0.94	1.12	1.15
Arena 8	0.50	0.67	0.79	0.82

A.3. Curvas de bomba implementada en canal

La bomba implementada corresponde el modelo Ebara Pumps 3M 50-125/3 que permite operar hasta aun caudal de 20 lt/seg o una altura máxima de 18 m

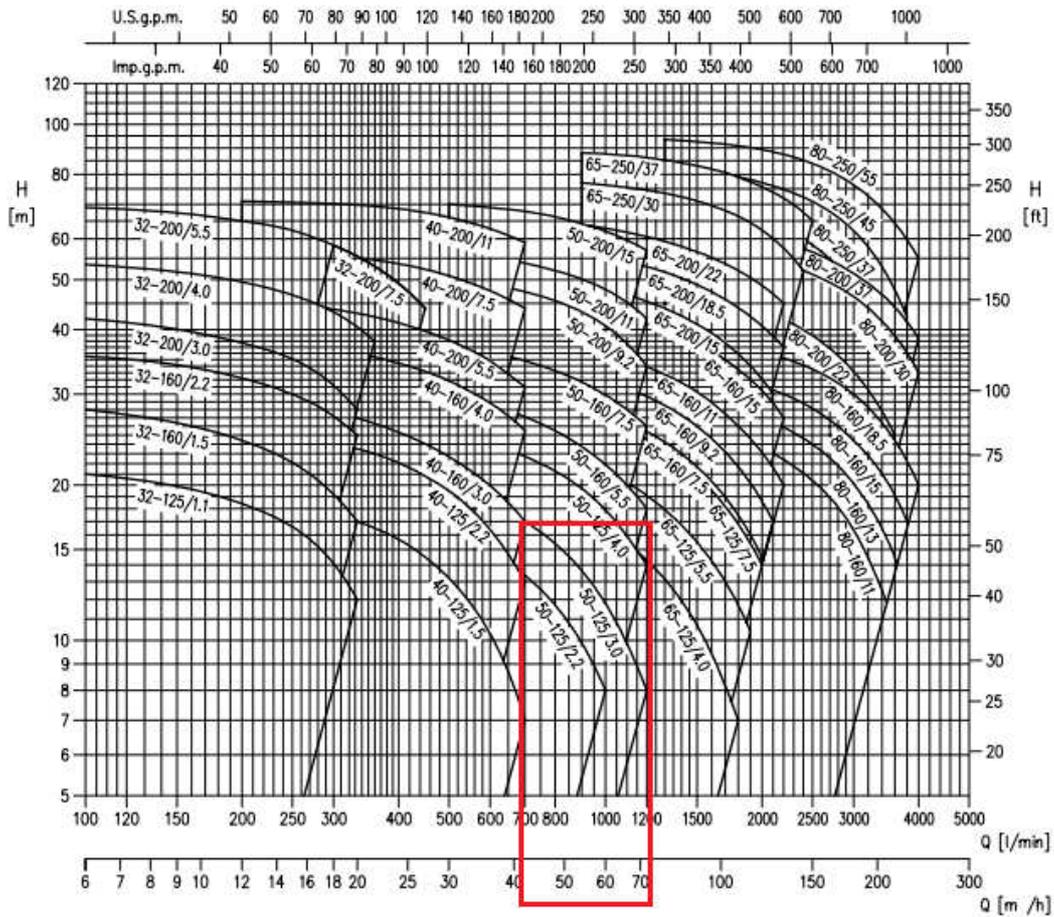


Figura 8.2: Curva de bomba Ebara Pumps 3M 50-125/3, Fuente: web del fabricante

A.4. Propagación de errores tubo Venturi

Se presentan expresiones usadas en la propagación de errores de las mediciones proporcionadas por el tubo Venturi desde la cual se han calibrado caudales pasantes por la instalación experimental.

Se tiene una función:

$$e = f(x, y, \dots z)$$

Donde el error asociado a la función está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{df}{dx} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{df}{dy} \sigma_y\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dz} \sigma_z\right)^2}$$

Para determinar el error de las funciones asociadas a las mediciones de los caudales es necesario establecer errores intrínsecos asociados a las mediciones directas, estas mediciones están asociadas a la masa de fluido, a través de una balanza, lectura de la diferencia de presiones, obtenida a través de un papel milimetrado, y tiempo medido a través de un cronómetro.

Tabla 8.2 Errores característicos de tubo Venturi:

Error	Notación	Valor
Tiempo [s]	σ_t	1
Masa [Kg]	σ_M	0,01
Lectura manómetro [m]	$\sigma_{\Delta h}$	0,0005

De esta manera la expresión para el error de caudal se calcula como:

$$Q(V, t) = \frac{V}{t}$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{1}{t} \sigma_V\right)^2 + \left(\frac{V}{t^2} \sigma_t\right)^2}$$

Donde el error asociado al volumen de los aforos es:

$$\sigma_V = \frac{\sigma_M}{\rho}$$

Finalmente el error asociado a las presiones del manómetro es de lectura directa y esta detallado en la Tabla 8.2, así se obtiene los resultados de propagación de errores de la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Calibración tubo Venturi y sus errores

Caudal [L/seg]	σ_Q [Lt/seg]	ΔP [cmMg]	$\sigma_{\Delta P}$ [cmMg]
0,7	0,16	1,1	0,05
1,2	0,16	2,5	0,05
1,7	0,38	5,5	0,05
2,4	0,70	8,6	0,05
2,8	0,75	13,5	0,05
3,3	1,15	14,3	0,05
3,6	1,31	19,0	0,05
3,9	1,60	21,0	0,05

A.5. Esfuerzo de corte logarítmico

Para implementar esta fórmula se deben ajustar los parámetros requeridos en cuanto al lecho y al flujo.

La constante κ se fija a un valor de 0,41.

δ_R se ajustó a través de las fotografías tomadas para estudiar la infiltración del concentrado de cobre en el lecho, en general se encontró que los valores de δ_R correspondían a valores en el rango de 0,003m y 0,006m, con errores aproximados de 0,001m provenientes de valores excepcionales que escapan del rango, luego se usó un valor promedio de todas las mediciones de las fotografías lo que deja a δ_R con un valor de 0,005m.

Z es la posición cuyo origen se encuentra un diámetro por debajo de la rugosidad más alta, donde $A=0$, definido en z_t . z_t Está ubicado aproximadamente a $d_{50\text{ grava}}$, esto no fue medido, pero en promedio es la zona donde el flujo ya ha tenido que pasar por alguna partícula de lecho por lo tanto el A del flujo es 0.

El valor de $\frac{\langle \bar{u} \rangle \delta_R}{u_*}$ se estimó como un valor constante, tomado desde los estudios de Nikora et al. (2001) y Czernuszenko (2011) con un valor de 5,6, debido al Reynolds presente en calculado desde las experiencias.

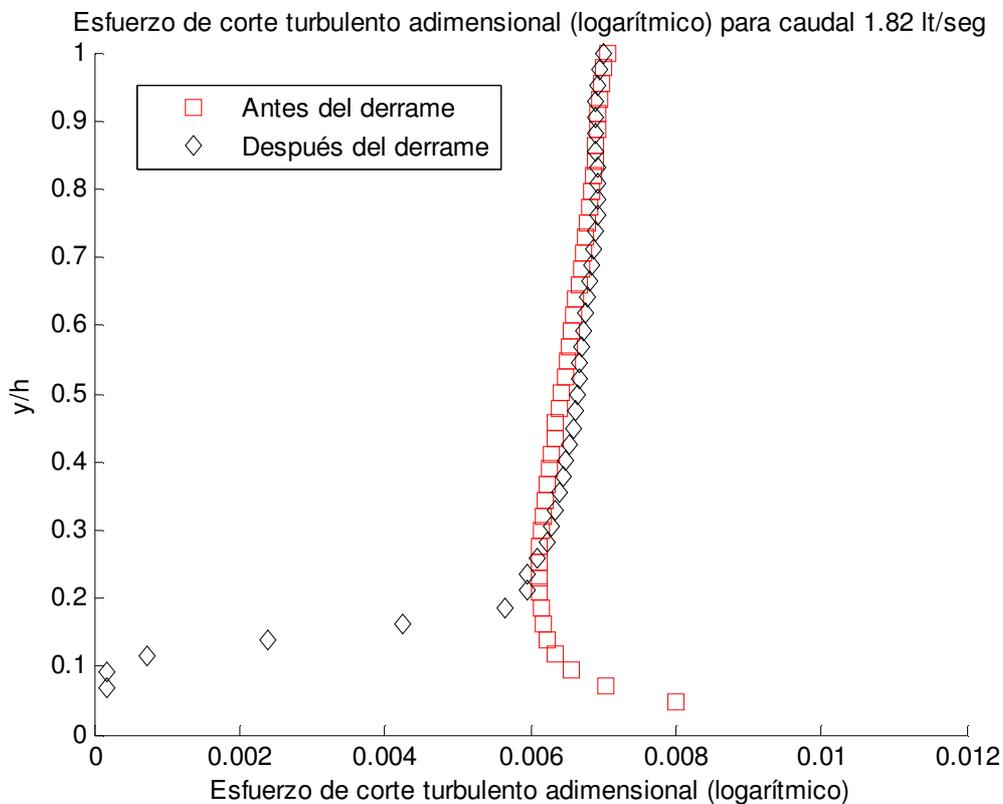


Figura 8.3: Esfuerzo logarítmico para caudal de 1,82 lt/seg

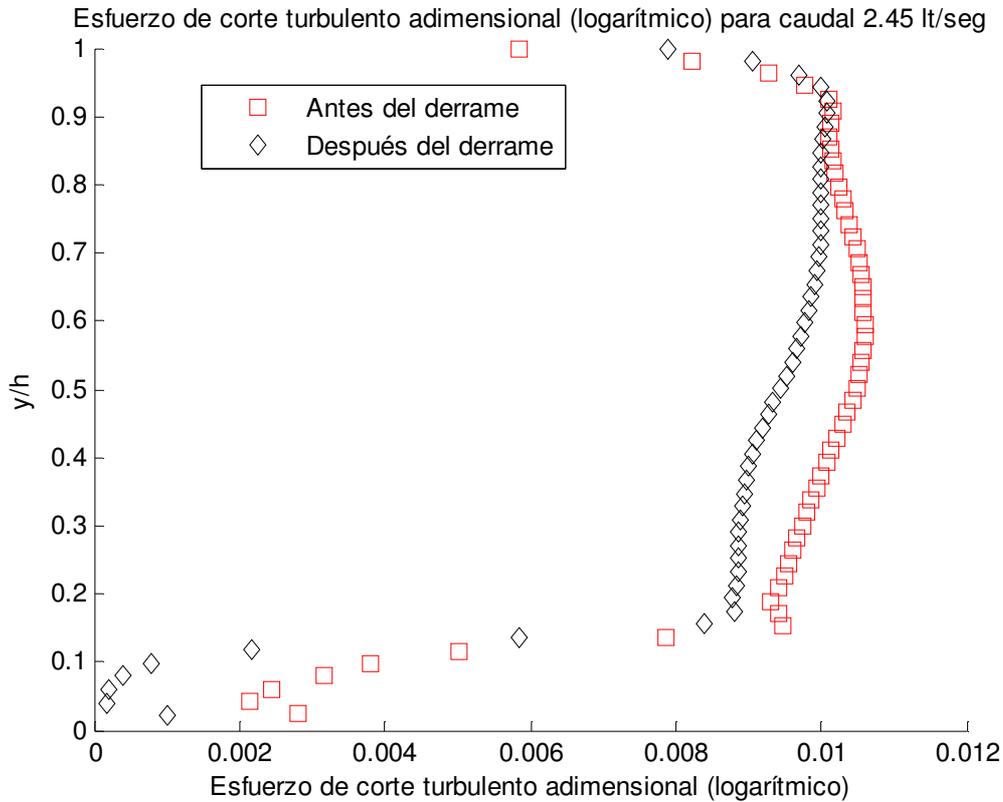


Figura 8.4: Esfuerzo logarítmico para caudal de 2,45 lt/se

Los esfuerzos de corte logarítmicos mostrados en la Figura 8.3 no se ajustan a los resultados esperados, dado que muestra un valor constante durante prácticamente todo el desarrollo vertical del flujo, y este problema se ha tenido antes y después de derramar el concentrado de cobre, esto hace desconfiar de los esfuerzos de corte turbulentos encontrados en la sección 5.5, si bien, no se tiene la forma esperada, los esfuerzos de corte logarítmicos mostrados en la Figura 8.3 son coherentes a grandes magnitudes con los mostrados en la Figura 8.4 al ser menores por ser implementados con un menor caudal, esto permite establecer relaciones entre el esfuerzo de corte y la infiltración del concentrado de cobre.

Por otro lado la Figura 8.4 muestra un esfuerzo de corte logarítmico con la forma típica esperada, las relaciones entre los esfuerzos de corte logarítmicos y los esfuerzos de corte turbulento se relacionarán en la sección 5.6

A.6. Granulometría concentrado de cobre

La granulometría fue obtenida mediante el granulómetro laser del laboratorio de sedimentología del Departamento de Geología.

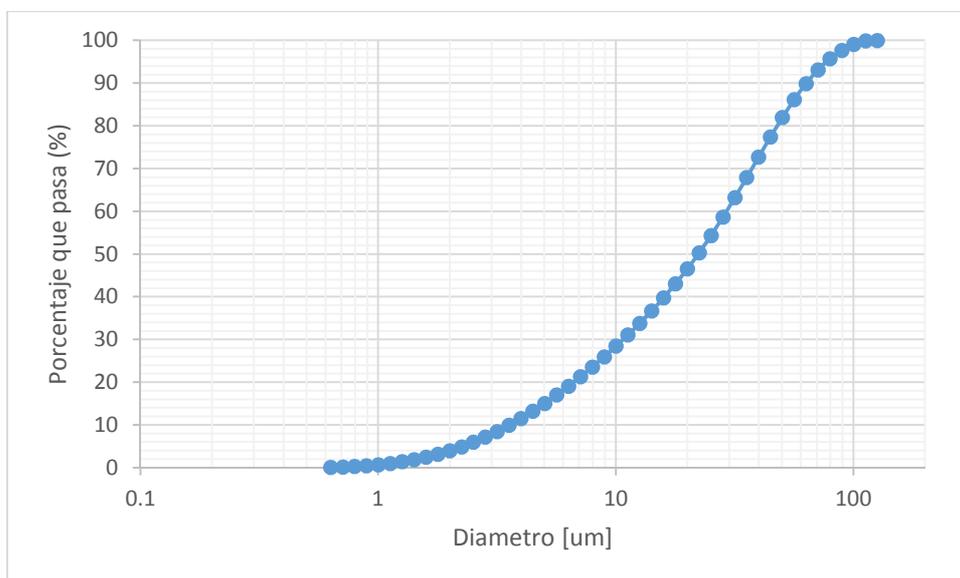


Figura 8.5: Curva Granulométrica de Concentrado de Cobre

Tabla 8.4: Resultados granulometro laser para el análisis de Concentrado de Cobre

Diámetro [mm]	% Pasante	Diámetro [mm]	% Pasante	Diámetro [mm]	% Pasante
0,632	0,04	3,991	11,49	25,179	54,34
0,71	0,13	4,477	13,2	28,251	58,65
0,796	0,26	5,024	15,04	31,698	63,19
0,893	0,44	5,637	17	35,566	67,9
1,002	0,68	6,325	19,07	39,905	72,68
1,125	0,99	7,096	21,25	44,774	77,41
1,262	1,38	7,962	23,54	50,238	81,95
1,416	1,86	8,934	25,93	56,368	86,16
1,589	2,44	10,024	28,43	63,246	89,91
1,783	3,13	11,247	31,04	70,963	93,11
2	3,94	12,619	33,78	79,621	95,7
2,244	4,87	14,159	36,67	89,337	97,66
2,518	5,93	15,887	39,74	100,237	99,05
2,825	7,12	17,825	43,01	112,468	99,88
3,17	8,44	20	46,52	126,191	99,97
3,557	9,9	22,44	50,29		

Tabla 8.5: Diámetros característicos de concentrado de cobre (interpolaciones lineales)

Tamaños principales del concentrado de cobre (linealmente interpolados) [μm]			
d_{16}	d_{50}	d_{84}	d_{90}
5,32	22,44	53,22	63,46