



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE RELAVE EN UN LECHO DE GRAVA  
EN EL MARCO DE LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE RÍOS POR  
ACCIDENTES MINEROS. EXPERIMENTOS CON UN TOMÓGRAFO.

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

FERNANDO JAVIER CAMINO SÁNCHEZ

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

SANTIAGO DE CHILE  
2021

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

**POR:** FERNANDO JAVIER CAMINO SÁNCHEZ

**FECHA:**08/01/2021

**PROFESOR GUIA:** YARKO NIÑO CAMPOS

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE RELAVE EN UN LECHO DE GRAVA EN EL MARCO DE LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE RÍOS POR ACCIDENTES MINEROS. EXPERIMENTOS CON UN TOMÓGRAFO.**

En los últimos años han ocurrido en forma reiterada accidentes mineros que han provocado contaminación en el medio ambiente y a las comunidades cercanas. En específico, el presente estudio se enfoca en los procesos de transporte de relaves en ríos con lecho de grava producto de descargas accidentales de relaves. En el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, se utilizó un montaje experimental existente que consiste en una tubería de 10 m de largo y diámetro 0,1 m, sin pendiente y con lecho de grava fijo, lo cual permitirá simular el comportamiento de un río con lecho de grava, el que se ve afectado por la contaminación de relave. Se realizaron pruebas experimentales variando las concentraciones del relave y el caudal que se ingresará al sistema, el cual fue obtenido del tranque Barahona de División El Teniente-Codelco. Se utilizó un tomógrafo, el cual mide el flujo y campo de concentración del sedimento en suspensión. Este instrumento posee sensores no invasivos. Mediante el sistema Particle Image Velocimetry (PIV) y videos se registraron la velocidad del flujo y los relaves.

Para los resultados de concentración obtenidos por el tomógrafo, se observan que para mediciones en el lecho representaba de buena forma las concentraciones medidas con las reales. Sin embargo, en el caso de mediciones de concentración en suspensión, en algunos casos no representaba en forma óptima los valores de concentración en suspensión, y esto se debe principalmente a la resolución del pixel del tomógrafo.

Se obtuvo como resultado del procesamiento de datos el gasto sólido de fondo para cada experimento, el cual se acopla de buena forma en función del esfuerzo de corte con las curvas de los autores clásicos. El gasto sólido de acuerdo a ellos, es sobrestimado. Con respecto al umbral de incorporación de las partículas en suspensión se comporta en forma satisfactoria con respecto a lo propuesto por Niño et al. (2003).

## Dedicatoria

A mis padres que me han acompañado y apoyado en cada momento.  
A Catalina por apoyarme durante este proceso.

## Agradecimientos

proyecto Fondecyt N°1140767

Al profe Yarko por la paciencia.

A Jorge Fuentes, por el apoyo y la ayuda durante la época de laboratorio.

A Natalia Bustamante por la ayuda durante todo el periodo de Estudios y tesis.

# Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1.    Introducción .....	2
1.2.    Objetivos .....	4
1.2.1.    Objetivos Generales .....	4
1.2.2.    Objetivos Específicos .....	4
1.3.    Metodología .....	5
1.3.1.    Estudio de fenómenos físicos que gobiernan el experimento .....	5
1.3.2.    Puesta en marcha de instalación experimental .....	5
1.3.3.    Desarrollo de los experimentos .....	5
1.3.4.    Análisis de resultados .....	5
1.4.    Organización del Informe .....	5
Capítulo 2 Marco Teórico .....	7
2.1.    Infiltración.....	8
2.2.    Parámetros adimensionales .....	9
2.2.1.    Esfuerzo de corte .....	9
2.2.2.    Densidad relativa.....	9
2.2.3.    Gasto sólido de fondo.....	9
2.2.4.    Números de Reynolds de la partícula.....	9
2.1.    Transporte de sólidos .....	10
2.1.1.    Gasto Sólido de Fondo .....	10
2.1.2.    Gasto sólido en suspensión.....	11
2.1.3.    Velocidad de sedimentación.....	12
2.1.    Relave Minero.....	14
2.2.    Estratigrafía .....	14
2.2.1.    Capa exterior (Outer layer).....	14

2.2.2.	Capa Logarítmica (logarithmic layer) .....	15
2.2.3.	Subcapa inducida por la forma .....	15
2.2.4.	Subcapa interfacial .....	15
2.2.5.	Subcapa Subsuperficial .....	15
2.3.	Tomógrafo.....	16
2.3.1.	Algoritmo de reconstrucción .....	17
2.4.	Velocimetría y procesamiento de imágenes.....	18
2.4.1.	Particle Tracking Velocimetry (PTV) .....	18
2.4.2.	Particle Image Velocimetry (PIV).....	19
2.4.1.	Procesamiento de imágenes.....	20
2.4.2.	Caracterización del flujo y Resultados PIV-Fuentes 2017 .....	20
2.4.2.1.	Intensidad de la turbulencia .....	20
2.4.2.2.	Esfuerzo de corte experimental (PIV) .....	21
Capítulo 3	Metodología experimental.....	23
3.1.	Instalación experimental .....	24
3.1.1.	Bomba .....	25
3.1.2.	Tomógrafo resistivo .....	25
3.1.3.	Cámara Gopro .....	27
3.2.	Calibración del Tomógrafo .....	27
3.2.1.	Calibración de tomógrafo para Sedimento en el lecho.....	28
3.3.	Calibración Tomógrafo sedimento de fondo.....	29
3.4.	Calibración del tomógrafo para el caso de sedimento en suspensión .....	32
3.5.	Granulometría relave y grava.....	34
3.6.	Ensayo de densidad máxima y mínima.....	36
Capítulo 4	Resultados Experimentales.....	38
4.1.	Resultados Tomógrafo .....	39
4.2.	Granulometría depositada .....	39
4.3.	Estratigrafía.....	42
4.4.	Series de tiempo lecho .....	42

4.5.	Series de tiempo suspensión .....	47
4.6.	Tomogramas.....	52
Capítulo 5	Análisis de resultados .....	57
5.1.	Gasto Sólido de fondo.....	58
5.2.	Sedimento en suspensión .....	62
Capítulo 6	Discusión y Conclusiones .....	68
6.1.	Discusión.....	69
6.1.1.	Montaje experimental.....	69
6.1.2.	Instrumentos .....	69
6.1.3.	Metodología experimental.....	70
6.2.	Conclusiones .....	70
6.2.1.	Metodología experimental.....	71
6.2.2.	Estratigrafía .....	71
6.2.3.	Gasto sólido de fondo.....	72
6.2.4.	Gasto sólido en suspensión.....	72
	Bibliografía .....	74
ANEXO A:	PIV .....	78
ANEXO B:	Calibración tubo de Venturi .....	81

# Índice de Tablas

Tabla 3-1: Curva de operación de bomba .....	25
Tabla 3-2: Diámetros característicos del sedimento .....	36
Tabla 3-3: Densidades del relave usado en los experimentos según el método japonés ..	37
Tabla 4-1: Resumen de volumen de relave ingresado al sistema y la concentración real obtenida en la sección del tomógrafo.....	40
Tabla 4-2: D <sub>50</sub> relave depositado por tramo de la tubería. ....	42
Tabla 4-3: D <sub>90</sub> relave depositado por tramo de la tubería. ....	42
Figura 4-14-4: Concentración adimensional de relave depositado en función de Reynolds .....	47
Tabla 5-1: Gasto sólido de fondo .....	58
Tabla 5-2: Resumen experimentos gasto sólido de fondo .....	60
Tabla 5-3: Velocidad de sedimentación .....	62
Tabla 5-4: Umbral de incorporación .....	62
Tabla 5-5: Cálculo de Gasto sólido en suspensión .....	66



# Índice de Figuras

Figura 2-1:Subdivisión del flujo en regiones específicas (Nikora, 2001).....	16
Figura 2-2: Grilla de reconstrucción de imagen (ITS, 2011).....	17
Figura 2-3: Esquema de desplazamiento de dos imágenes consecutivas, PTV. Partículas oscuras y claras representan los instantes $t_0$ y $t_0+\Delta t$ (Fuentes 2017). ....	19
Figura 2-4 Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos, PIV. Partículas oscuras y claras representan el instante $t_0$ y $t_0+\Delta t$ (Fuentes, 2017). ....	20
Figura 2-5: Perfiles de la intensidad de turbulencia $u'$ y $v'$ con las expresiones de Nezu y Nakagawa(1993) y Kiroto y Graf (1994).....	21
Figura 2-6: Perfiles de esfuerzo de corte de Reynolds total adimensionalizado en los planos 1,2 y 3 (Fuentes, 2017). ....	22
Figura 3-1: Montaje experimental (Fuentes 2017).....	24
Figura 3-2 a):Sección transversal tuberías en tramo de PVC b)acrílico respectivamente (Fuentes 2017).....	25
Figura 3-3: Instalación experimental del tomógrafo <b>a)</b> Tomógrafo resistivo <b>b)</b> Planos de medición.....	26
Figura 3-4: Sistema de adquisición P2+.(ITS,2013).....	26
Figura 3-5: Cámara Gopro Hero 3. ....	27
Figura 3-6: Esquema referencia W.(Fuentes, 2017) ....	28
Figura 3-7: Comparación de las concentraciones promedio en base a referencia W y WG. ....	30
Figura 3-8. Tomogramas colectados durante la calibración del relave y relave y grava, aumentando su concentración gradualmente hacia la derecha.....	31
Figura 3-9: Calibración Tomógrafo. Comparación de la concentración de relave utilizando la referencia W y Referencia WG. ....	32
Figura 3-10: Instalación de filtración para determinar masa de sedimento. ....	33
Figura 3-11: Calibración tomógrafo. Comparación de la concentración de relave en suspensión utilizando la referencia W y referencia WG.....	34
Figura 3-12: Laser MasterG-2000.....	35
Figura 3-13: Granulometría relave y grava. ....	35
Figura 3-14: Instrumentos utilizados para método Japonés.....	37
Figura 4-1:Ilustración tramos de instalación experimental. ....	39
Figura 4-2 Distribución de relave depositado por tramo con respecto al depositado en toda la sección. ....	41
Figura 4-3: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 1.5 l. ....	43

Figura 4-4 Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 2.0 l. ....	44
Figura 4-5: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 2.5 l. ....	45
Figura 4-6: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 3.0 l. ....	46
Figura 4-7: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 1.5 l. ....	48
Figura 4-8: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 2 l. ....	49
Figura 4-9: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 2.5 l. ....	50
Figura 4-10: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 3 l. ....	51
Figura 4-11: Concentración adimensional de relave en suspensión en función de Reynolds .....	52
Figura 4-12: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 1.5 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente. ....	53
Figura 4-13: Tomogramas en base a referencia W para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 1.5 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.....	53
Figura 4-14: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente. ....	54
Figura 4-15: Tomogramas en base a referencia W para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.....	54
Figura 4-16: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente. ....	55
Figura 4-17: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente. ....	55
Figura 4-18: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 3.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente. ....	56

Figura 4-19: Tomogramas en base a referencia $W$ para relave minero a distintos caudales para un volumen de 3.0 litros de sedimento. Las variables $t_0$ , $t_1$ y $t_f$ corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.....	56
Figura 5-1: Descripción parámetro $e/D_g$ y $D(z)$ . Fuentes (2017).....	59
Figura 5-2: Gasto sólido adimensional en función $e/Dg$ y $D(z)$ . Se presentan datos experimentales del presente estudio mediante Relave minero, de Niño et al. (2018), Fuentes (2017) mediante partículas de vidrio, Khunle et al (2013) expresión predictiva de gasto sólido de Meyer- Peter y Müller (1948). ....	61
Figura 5-3: Comparación entre los resultados experimentales y los criterios de umbrales de incorporación propuesto por Niño et al. (2003) y Van Rijn (1984). ....	63
Figura 5-4: Concentración de sedimento en suspensión partido por la concentración de referencia como función de $z/h$ , valores filtrados. ....	65
Figura 5-5: Gasto sólido en suspensión para 1.5 l, 2.0 l, 2.5 l y 3.0 l de relave vertido al sistema. ....	67

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1. Introducción

El presente estudio se enmarca dentro del proyecto Fondecyt N°1140767 que busca realizar una investigación experimental y numérica para los ríos con lecho de grava que son contaminadas por sedimentos finos o partículas metálicas transportadas por sedimentos vertidos en accidentes mineros.

En general, el concentrado de cobre y los relaves son transportados mediante tuberías atravesando largas distancias. Por lo cual la rotura de una tubería puede provocar grandes derrames en forma muy rápida, que puede pasar desapercibido y ser detectado cuando el daño al ecosistema es irreversible. puede ingresar cauces aluviales generando una alta contaminación debido a su toxicidad. Dentro de las mineras chilenas que transportan concentrado de cobre mediante tuberías destacan Collahuasi (200 km), Escondida Línea 1 (170 km), Escondida Línea 2 (179 km), entre otras. Las que transportan relave mediante tuberías destacan Minera Los Pelambres (55 km).

Por otra parte, el material fino puede provenir ya sea de deslizamientos y en particular de la minería asociado a fallas en tranques de relaves. Las fallas se pueden producir por un mal manejo del agua, falla de cimientos, falla de drenajes, erosión del terreno, También destacan las fallas de tuberías para relaves las que se producen principalmente por un mantenimiento inadecuado o daño físico a la tubería, según Appel (2004). En los últimos años han ocurrido importantes accidentes a nivel mundial asociados a fallas en los tranques de relaves o roturas en las canaletas que lo transportan, y estos han afectado tanto al medioambiente como a las comunidades que la rodean. Durante los últimos veinticinco años se han presentado más de treinta accidentes graves en todo el mundo, lo cuales causaron daños al medio ambiente y algunos incluso muertes en la población. Dentro de los accidentes más relevantes están la falla en la Presa Mont Polley- Canadá el año 2014, donde se vertieron aproximadamente 25 Mm<sup>3</sup>, los cuales fueron descargados en el río y lago Quesnel, modificando la temperatura, turbidez, conductividad del agua y los sedimentos del lecho del río (Petticrew, 2015), la falla en dique Fundão-Brasil donde se vertieron aproximadamente 32 Mm<sup>3</sup> contaminando al menos 3 ríos y llegando hasta el océano el año 2015 y la rotura de un tranque de relave de la empresa Vale de Minas Gerais en el sureste de Brasil, donde se vertieron aproximadamente 12 Mm<sup>3</sup> de relave en el río Paraoeba, sepultando parte de las instalaciones del complejo Corrego do Feijao, dejando cientos de fallecidos.

Por otro lado, en Chile se han reportado varios accidentes que involucran relaves de cobre, Onemi (2015) reporta tranques de relave abandonados en la Región de Atacama que se vieron afectados producto de los aluviones del 2015, por lo cual se generó arrastre de relaves a zonas pobladas. Por otro lado, producto del terremoto ocurrido en septiembre de 2015 en la Región de Coquimbo generó el arrastre de relaves mineros en dos quebradas, una de las cuales posee escurrimiento de aguas superficiales, provenientes de la Compañía Minera Santa Teresa, estimado un escurrimiento por arrastre de aguas superficiales de 10 km aguas abajo del tranque. En marzo de 2018 Minera Lumina Copper reportó la rotura de ducto que transportaba relaves de la Mina Caserones. En enero de 2019

se generó derrame de relave por parte de Codelco Andina, en el Río Blanco en los Andes, afectando en forma directa la captación de la planta de agua potable de El Sauce, perteneciente a ESVAL.

Cabe destacar que en la actualidad existen un total de 603 depósitos de relaves en Chile, de los cuales 216 se encuentran activos, 244 no activos y 143 sin información, de acuerdo a lo indicado por Sernageomin (2015), en el Catastro de depósitos de Relaves. Por esta razón es importante investigar como es el proceso de contaminación de lechos de grava con partículas finas.

Por esta razón en este estudio se investiga sobre la contaminación de lechos de grava con relaves mineros que pueden afectar los ríos de Chile. Sin embargo, se han realizado pocos estudios asociados a la contaminación de lecho con relave, por lo cual se toma como base los estudios realizar por Gibson et al. (2009), Huston y Fox (2015) quienes realizaron investigaciones sobre la infiltración de sedimentos finos en lechos de grava. El sedimento fino se deposita en los espacios intersticiales de los granos más gruesos del lecho y pueden impedir el intercambio de agua en la zona hiporreica, generando de esta forma impactos ecológicos considerables (Lisle 1989, Iseya 1987). Kuhnle et al., (2013) y Niño et al (2018) realizaron experimentos en un canal de laboratorio con lecho de grava inmóvil, con arenas como sedimento contaminante, determinando de esta forma que la exposición del sedimento con respecto a la grava es una variable clave que controla la velocidad del transporte. A medida que se incrementa éste respecto a la grava, el esfuerzo de corte del lecho disminuye gradualmente, atribuyéndose a la disminución de la rugosidad de la superficie, y aumentando así el transporte de arena.

Giguere et al (2008) realizó múltiples estudios relativos a ERT, donde utilizando flujos de pulpa, el que ha logrado caracterizar mediante algunas técnicas de reconstrucción, tales como LBP y Generalized Iterative Algorithm (GIA), reconstruyó tomógramas de concentración. Donde se obtuvo resultados similares de concentración, donde la principal diferencia se observa a bajas velocidades de flujo, cuando las partículas se observan en el fondo.

El estudio experimental realizado en esta tesis permite analizar a escala de laboratorio un modelo que sea capaz de representar un lecho de río con fondo de grava inmóvil, y reproducir los diferentes aspectos del flujo y transporte del relave, ingresados aguas arribas. Para ello se utilizó una instalación existente en Laboratorio Francisco Javier Domínguez que consiste en una tubería de 10 m de longitud y diámetro 0,1 m, con lecho de grava inmóvil de diámetro 10.2 mm. Se utilizaron relaves del Tranque Barahona de la División El Teniente de Codelco de diámetro medio de 0.192 mm. Se usó un Tomógrafo Resistivo (ERT) y la técnica de velocimetría, Particle Image Velocimetry (PIV), para la adquisición de datos de concentración de relaves de fondo y suspensión, y el campo de velocidades respectivamente. Permitiendo así cuantificar el gasto sólido de fondo, en suspensión y la estratigrafía del lecho.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos Generales

Evaluar en base a un estudio experimental los procesos del transporte de relave en los ríos con lecho de grava debido al transporte de relave que se mezclan con el lecho del río modificando la estratigrafía del lecho.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Poner en marcha y realizar la mantención de tubería experimental con lecho de grava inmóvil existente en el Laboratorio Francisco Javier Domínguez de la Universidad de Chile.
- Generar una metodología para determinar las condiciones experimentales iniciales del proyecto. Determinación de gasto sólido de fondo y en suspensión.
- Determinar a través de un tomógrafo el campo de concentración de los relaves como carga de fondo entre las gravas. Registrar con videos los procesos del transporte del relave.
- Cuantificar la cantidad de relave y grava que quedará en el lecho mediante el uso de tamices en diferentes tramos a lo largo de la sección de estudio de la tubería, a fin de determinar la granulometría en el lecho.
- Analizar los experimentos en base a las distintas concentraciones de relaves para distintos caudales, determinando la estratigrafía del sedimento fino en lecho de grava.

### 1.3. Metodología

#### 1.3.1. Estudio de fenómenos físicos que gobiernan el experimento

Es importante entender los fenómenos físicos del transporte de sedimentos, principalmente el de relave de cobre en un lecho de grava, debido a los reiterados desastres naturales provocados por fallas en tranques de relave o rompimiento de tuberías que transportan el material.

#### 1.3.2. Puesta en marcha de instalación experimental

En esta etapa se considera utilizar la instalación experimental de una tubería con lecho de grava existente en el laboratorio de Hidráulica Francisco Domínguez, donde se verificará su estado y se procederá a limpiar realizar las mantenciones necesarias para la operatividad del sistema.

#### 1.3.3. Desarrollo de los experimentos

Una vez que la instalación experimental se encuentre en óptimas condiciones, se desarrollará una metodología, en la cual se puedan optimizar los tiempos de ejecución y obtener buenos resultados. Una vez definida la metodología se realizarán los experimentos a definir, los cuales serán registrados mediante softwares computacionales y filmados para su posterior análisis.

#### 1.3.4. Análisis de resultados

En esta etapa se analizará el comportamiento del relave de cobre en la tubería de tal forma de determinar el gasto sólido de fondo y el gasto sólido en suspensión.

### 1.4. Organización del Informe

El siguiente informe se encuentra dividido en cinco capítulos descritos a continuación:

- Capítulo 1: Introducción. Se realiza una breve descripción de la problemática que generan los relaves de cobre para posteriormente contextualizar en forma general el desarrollo del estudio experimental, donde se detallan los objetivos generales y específicos.
- Capítulo 2: Marco teórico: Da a conocer la teoría y diferentes investigaciones realizadas en torno al PIV y uso de tomógrafo, además de estudios asociados a las estratigrafías de lecho de grava debido a la interacción con el relave. Posteriormente se realiza un análisis crítico de la información a tomar estableciendo las condiciones óptimas que permitirán desarrollar en forma adecuada los experimentos.



- Capítulo 3: Metodología experimental. En este capítulo se describe en forma detallada el estudio, considerando las instalaciones e instrumentos a utilizar, tales como tomógrafo, método PIV, tubo Venturi, etc.
- Capítulo 4: Resultados experimentales. Se presentan los resultados obtenidos utilizando el tomógrafo resistivo y PIV para determinar el gasto sólido de fondo y en suspensión del relave de cobre en el lecho de grava.
- Capítulo 5: Discusión y Conclusiones. Se discute y concluye acerca de la metodología utilizada para el desarrollo de los experimentos mediante el tomógrafo resistivo, indicando a su vez un análisis en los resultados de gastos sólido de fondo y en suspensión de los experimentos, así como los alcances de lo desarrollado.

## Capítulo 2 Marco Teórico

## 2.1. Infiltración

La contaminación en lecho de grava con material fino ha sido estudiada por varios autores (Diplas y Parker, 1985, Iseya y Ikeda, 1987, Beschta y Jackson, 1979, Niño et al., 2018), ellos observaron que los sedimentos finos interactúan con el lecho de grava y se genera infiltración en los espacios intersticiales del lecho.

Beschta y Jackson (1979) observaron que los sedimentos finos de diámetro mayor al tamaño del poro del lecho de grava, son depositados en la parte superior del sustrato, produciendo una especie de puente, que limita la infiltración de partículas más pequeñas al fondo del lecho. Reportaron que el número de Froude tiene una baja relación con la formación de puentes, ya que, para bajas tasas de transporte a través de las gravas, la intrusión alcanza un valor mínimo para valores de Froude entre 1 y 1.2. Sin embargo, para altas tasas de transporte de sedimento, la intrusión aumenta con un número de Froude más alto. Estos contrastes reflejan que la intrusión de finos en lechos de gravas es un proceso complicado y no totalmente entendido.

Diplas y Parker (1985), observaron que el material fino podía controlar la profundidad de la infiltración, y estas se generan cuando los sedimentos finos son más grandes que los poros del sustrato, limitando el libre movimiento de los sedimentos finos a través de los espacios intersticiales. Por otro lado, Iseya y Ikeda (1987) observaron que, a mayor cantidad de sedimento fino en los espacios intersticiales del lecho, estos generan la reducción en la rugosidad del lecho.

Wooster et al (2006). realizaron experimentos de infiltración mediante sedimento fino con lecho de grava inmóvil, donde se incorporó para cada experimento la misma cantidad de sedimento, pero a distintas tasas de alimentación. Observo que para las tasas de alimentación más altas se produjo menos infiltración de arenas en los depósitos subsuperficiales, que las con menor tasa de alimentación. Adicionalmente sugiere que la infiltración ocurre solo a una profundidad equivalente de unos pocos diámetros medio del lecho

Khunle et al. (2013) realizaron experimentos en un canal de laboratorio para evaluar los efectos del transporte de arena sobre un lecho de grava inmóvil, donde observa que a medida que se va llenando el lecho con arena, se presenta una disminución de los esfuerzos de cortes en el lecho en el orden del 32% al 44% y un aumento en el transporte de arena en 3 órdenes de magnitud.

Niño et al. (2018), realizaron experimentos mediante un canal de laboratorio, para evaluar el frente de arena que se mueve a través de un lecho de grava inmóvil, donde la carga de arena adimensional infiltrada a partir de los experimentos se obtiene mediante una función de los parámetros de Shield y la relación entre la altura del frente de arena menos la altura de la grava y el diámetro de la grava ( $e/D_g$ ). Esta relación es de 0.4 a -1. No se observó ningún efecto entre la relación del diámetro de la arena y grava y tampoco para el diámetro de la arena para el esfuerzo de corte crítico adimensional

## 2.2. Parámetros adimensionales

### 2.2.1. Esfuerzo de corte

El esfuerzo de corte corresponde a la adimensionalización del esfuerzo de corte sobre el lecho ( $\tau_0$ ) por el diámetro del sedimento ( $D_s$ ), densidad relativa ( $R$ ), aceleración de gravedad ( $g$ ) y densidad del agua ( $\rho$ ), siendo este:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\rho g R D_s} \quad (1)$$

### 2.2.2. Densidad relativa

La densidad relativa está asociada a la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) y la densidad del fluido ( $\rho$ ), la que se expresa de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2)$$

### 2.2.3. Gasto sólido de fondo

El gasto sólido de fondo adimensional está asociada al gasto sólido de fondo ( $q_s$ ) dividido por la raíz del diámetro del sedimento ( $D_s^3$ ), la densidad relativa ( $R$ ) y la aceleración de gravedad ( $g$ ), expresado como:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{g R D_s^3}} \quad (3)$$

### 2.2.4. Números de Reynolds de la partícula

El Reynolds de la partícula es una medida del tamaño relativo de la partícula con respecto al espesor de la subcapa viscosa. A mayor número de Reynolds, las partículas son más propensas a ser transportados en suspensión:

$$Re_{*p} = \frac{u_* D_s}{\nu} \quad (4)$$

siendo ( $u_*$ ) el esfuerzo de corte, ( $D_s$ ) diámetro representativo de la partícula y ( $\nu$ ) la viscosidad cinemática.

## 2.1. Transporte de sólidos

Si las condiciones de escurrimiento en un canal aluvial superan la condición umbral de arrastre, el flujo puede inducir al transporte de sedimento en el lecho. El transporte de sedimento se puede clasificar como transporte de fondo y transporte en suspensión, donde el transporte de fondo está asociado principalmente a las partículas que están en frecuente contacto con el lecho. Por el contrario el transporte en suspensión es aquel en que las partículas son transportadas en la columna de agua a una altura mayor de 2 veces el diámetro  $D_{50}$  del lecho, es decir, las partículas tienen un infrecuente contacto con el lecho, El transporte sólido de fondo ocurre fundamentalmente a través del deslizamiento, rotación y saltación de las partículas, donde en el primero la partícula se desplaza manteniendo contacto en el fondo del lecho sin rotar, en el segundo la partícula rota también manteniendo permanente contacto con el lecho, y en el tercero, la saltación es el mecanismo más frecuente y principal mecanismo del transporte de fondo.

Van Rijn (1984) indica que una partícula de sedimento se puede considerar en suspensión si ella permanece en la columna de agua por distancias superior a 100 veces su tamaño.

### 2.1.1. Gasto Sólido de Fondo

El movimiento del sedimento es gobernado principalmente por fuerzas hidrodinámicas, la gravedad y procesos de interacción de partículas con el lecho. Sus mecanismos de transporte corresponden principalmente a saltación, rotación y desplazamiento, siendo la saltación el más frecuente.

Engelund y Fredsøe (1976), Ashida and Michihue (1972), y Meter-Peter & Müller (1948) desarrollaron expresiones predictivas para el gasto sólido de fondo:

$$q_s^* = 18.74(\tau^* - \tau_c^*)(\tau^{*1/2} - 0.7\tau_c^{*1/2}) \quad (5)$$

$$q_s^* = 17(\tau^* - \tau_c^*)(\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2}) \quad (6)$$

$$q_s^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (7)$$

$\tau^*$  y  $\tau_c^*$  denotan los esfuerzos adimensionales de fondo y umbral de arrastre respectivamente y  $q_s^*$  representa el gasto sólido volumétrico adimensional.

Donde los valores de  $\tau_c^*$  son estimados como 0.05, 0.05 y 0.048 respectivamente.

Niño y García (1998) desarrollaron una expresión analítica que tiene la misma forma que la propuesta por Engelund y Fredsøe (1976); Dicha expresión fue desarrollada a partir de simulaciones de procesos de saltación:

$$q_s^* = \frac{a}{\mu_d} (\tau^* - \tau_c^*) (\tau^{*1/2} - b\tau_c^{*1/2}) \quad (8)$$

donde  $a$ ,  $b$ ,  $\mu_d$ ,  $\tau_c^*$  asociados corresponden a 11.5, 0.7, 0.3, 0.05 respectivamente.

Todas las ecuaciones que se presentaron predicen valores similares de gasto s3lido volum3trico de fondo adimensional. Cuando los valores de los esfuerzos de corte adimensional son cercanos a los esfuerzos de corte adimensionales cr3ticos, los valores de gasto s3lido volum3trico de fondo adimensional presentan una gran variaci3n para peque1as variaciones del esfuerzo de corte adimensional

### 2.1.2. Gasto s3lido en suspensi3n

El transporte en suspensi3n est3 asociado directamente al gasto s3lido en suspensi3n que proviene del lecho, que se pone en suspensi3n debido a las fuerzas hidrodin3micas o bien mediante part3culas que fueron incorporadas en suspensi3n y que nunca tienen contacto con el lecho, denominado washload.

Bagnold (1966) propuso los primeros criterios en el cual estim3 la condici3n umbral para la incorporaci3n de las part3culas en suspensi3n, basado en el supuesto que las part3culas permanecer3n en suspensi3n siempre cuando predominen la velocidad vertical de los remolinos turbulentos.

Si las part3culas son peque1as y su tiempo de respuesta es mucho menor a la escala de tiempo de fluctuaciones del flujo, entonces la velocidad horizontal es pr3cticamente igual a la velocidad del flujo, en cambio la velocidad vertical es aproximadamente igual a la del flujo menos la velocidad de sedimentaci3n.

Se utiliza el Modelo de Rouse (1937) para el coeficiente de la difusi3n turbulenta, donde la concentraci3n de sedimentaci3n queda definida como:

$$\frac{\bar{c}}{C_{ref}} = \left\{ \frac{1-\xi}{\xi} \frac{\xi_{ref}}{1-\xi_{ref}} \right\}^Z \quad (9)$$

donde  $C_{ref}$  es la concentraci3n de referencia a una altura  $z_{ref}$ , en la regi3n donde es v3lida la ley logar3tmica, donde  $\omega_s$  es la velocidad de sedimentaci3n. En general se considera  $z_{ref}$  como 0.05 la altura sobre la superficie del lecho.

$$z \approx 2.5 \frac{\omega_s}{u_*} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{z}{h} \quad (11)$$

$$\xi_{ref} = \frac{z_{ref}}{h} \quad (12)$$

Para determinar el gasto sólido en suspensión  $q_{ss}$ , se realiza la integral en la vertical de la velocidad media del flujo y la concentración del sedimento en suspensión.

$$q_{ss} = \int_{z_{ref}}^h \bar{u}(z) \bar{C}(z) dz \quad (13)$$

La ecuación anterior se puede discretizar y expresar en forma de sumatoria, tal como lo realizó Niño (2013).

$$q_{ss} = \sum_{z_{ref}}^h \bar{u}(z) \bar{C}(z) \Delta z \quad (14)$$

### 2.1.3. Velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación de una partícula de diámetro  $d_s$ , según Niño (2013), se define como:

$$\frac{\omega_s^2}{g d_s R} = \frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \quad (15)$$

donde  $R$  es la densidad relativa,  $C_D$  el coeficiente de arrastre que está en función del número de Reynolds de la partícula  $Re_p$ . Para estimar el valor de  $C_D$  se puede utilizar la ecuación de ajuste de la curva típica correspondiente a esferas de  $C_D = f(Re_p = \omega_s d_s / \nu)$ ; Según Yen, (1992):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + 0.15 Re_p^{1/2} + 0.017 Re_p \right) - \frac{0.208}{1 + 10^4 Re_p^{-1/2}} \quad (16)$$

Para calcular la velocidad de sedimentación, se debe realizar en forma iterativa a dar un valor inicial de  $\omega_s$ , con el que se permite obtener un  $Re_p$ , con el que se puede obtener el  $C_D$ , donde la ecuación

arroja un valor para  $\omega_s$ . La iteración finaliza cuando el valor dado de  $\omega_s$  es igual al valor arrojado  $\omega_s$ .

Las velocidades típicas de sedimentación son el orden de 0.01 a 10 cm/s. para partículas de arena.



## 2.1. Relave Minero

Los Relaves mineros, son una mezcla de limos, arcillas, arenas y metales pesados. En Chile se encuentran principalmente en las zonas mineras del centro y norte del país. Los vertimientos de estos relaves en sistemas fluviales pueden generar efectos adversos en el corto y largo plazo, afectando la biodiversidad del entorno dada su toxicidad.

Los relaves se suelen acumular en tranques ya que se generan producto de los descartes de las operaciones de separación de los metales útiles para la industria minera. Una gran cantidad de tranques en Chile se encuentran abandonados, por lo cual su composición y estado es muy variable entre una y otra, y dependen principalmente de la mineralogía de origen.

La contaminación de los sistemas fluviales producto del derrame de relave se puede producir por rotura de un tranque y la descarga del sedimento en el sistema fluvial, o bien a través de tuberías que transportan y que son susceptibles a roturas.

Turnes et al. (2013) reportaron que el mayor problema de contaminación en sistemas fluviales está asociados a la industria minera, ya que más del 70% de los sedimentos contaminantes presentan tiempos de residencias superiores a los 200 años en los ríos.

## 2.2. Estratigrafía

El flujo en lechos rugosos permeables se puede dividir en cinco zonas específicas (Figura 2-1), debido a que las ecuaciones de Navier Stokes son promediadas doblemente, esto ocurre cuando la profundidad del lecho,  $H$ , es mucho mayor a la altura característica de la rugosidad. (Nikora et. Al 2001).

Las cinco zonas se pueden representar de la siguiente forma.

### 2.2.1. Capa exterior (Outer layer)

En esta región los efectos viscosos y de forma son despreciables y las ecuaciones promediadas espacialmente, son idénticas a las promediadas en el tiempo. Las escalas características para esta región son velocidad friccional,  $u_*$ , Velocidad máxima del flujo,  $U_{m\acute{a}x}$  y profundidad,  $Z$ . La distribución de la velocidad en esta región puede ser descrito por la ley del defecto de velocidad (Nezu y Nakagawa, 1993).

### 2.2.2. Capa Logarítmica (logarithmic layer)

En esta región los efectos viscosos y de forma son despreciables, y las ecuaciones promediadas espacialmente son idénticas a las promediadas en el tiempo, tal como son en la capa exterior. Sin embargo, las escalas características varían con respecto a la exterior, dado que predomina la velocidad friccional,  $u_*$ , la profundidad del lecho y la escala característica de la topografía del lecho. La capa logarítmica ocupa la zona equivalente a  $(2-5) \Delta < (z - z_t) < 0.2 H$  (Rapauch et al 1991; Nezu Y Nakagawa 1993).

Para la velocidad promediada en el espacio  $\langle \bar{u} \rangle$  obtenemos la capa logarítmica, donde:

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(Z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left[ \frac{Z}{\delta_R} \right] + \frac{\langle \bar{u} \rangle(\delta_R)}{u_*} \quad (17)$$

Donde  $k$  es Constante de Von Kármán,  $Z = z - z_t$ ,  $\delta_R = Z_R - z_t$ ,  $z_t$  es la altura de los valles de los elementos de rugosidad,  $z_r$  es límite inferior de la región logarítmica.

### 2.2.3. Subcapa inducida por la forma

El flujo en esta zona es influenciado por los elementos que están en la región justo arriba de la cresta de la rugosidad. En este caso se refleja una nueva característica de la subcapa, en comparación con la capa logarítmica, ya que las tensiones inducidas se deben a la separación del flujo de los elementos de rugosidad (Gimenez- Curto y Corniero Lera 1996). Según Rapauch et al (1991) la rugosidad puede influir en la estructura del flujo local dentro de  $0 < (z - z_t) < (1 - 4) \Delta$ .

### 2.2.4. Subcapa interfacial

Esta capa también se encuentra influenciada por los elementos de rugosidad y ocupa la región del flujo entre las crestas y las depresiones de la rugosidad, donde la función geométrica  $A(z)$  cambia de 1 a 0 para lecho impermeable y de 1 a  $A_{\min}$  para lecho permeable. Una nueva característica importante en esta capa es el asociado a las formas de arrastre, donde el espesor de la subcapa interfacial se define como  $\delta_I = Z_c - Z_t$ . (Figura 2-1).

### 2.2.5. Subcapa Subsuperficial

El flujo en esta capa ocupa los espacios intersticiales entre las partículas, el cual es impulsado por la fuerza de gravedad y los momentum del flujo provenientes de las capas superiores. El límite de la capa subsuperficial se logra identificar como  $Z$ , donde  $dA/dz$  es cercano a cero. La escala característica en esta capa es la velocidad de corte,  $u_*$ , y la escala característica de poros.

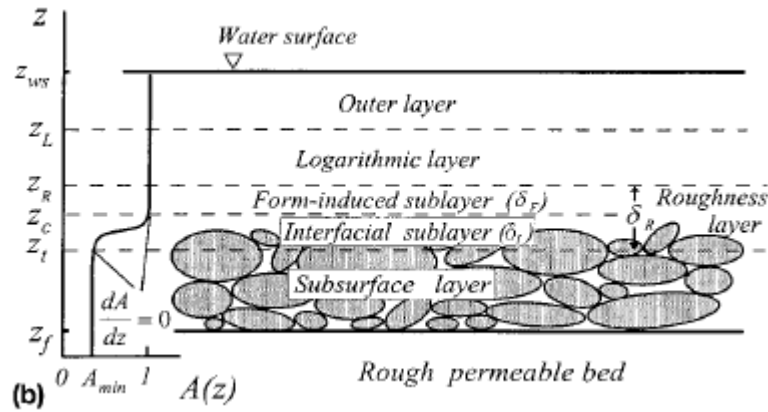


Figura 2-1:Subdivisión del flujo en regiones específicas (Nikora, 2001)

### 2.3. Tomógrafo

El tomógrafo es un dispositivo no intrusivo que funciona en base a la distribución de conductividad eléctrica en un medio, pudiendo caracterizar mezclas bifásicas, multifásicas o reacciones como, por ejemplo, líquida-líquida, sólido-líquida, gas-líquida, aceite-agua-gas. La adquisición de información se realiza de una forma no intrusiva a través de los sensores que el tomógrafo posee en su perímetro.

El principio de la tomografía mediante resistividad eléctrica(ERT) es la inyección de corriente eléctrica entre un par de electrodos donde se miden los diferenciales de potencial entre los pares de electrodos libres. Esto se realiza por todos los pares de electrodos hasta completar la rotación completa del campo eléctrico del anillo. Los datos adquiridos son interpretados mediante un algoritmo de reconstrucción de imágenes que genera una imagen de la sección transversal de la tubería correspondiente a la conductividad eléctrica dentro del sensor (Giguere et al., 2008).

La tomografía mediante resistividad eléctrica permite obtener la distribución de la conductividad eléctrica, a través de su sistema P2+, en base al principio planteado por Giguere et al. (2008). El sistema de adquisición de datos es responsable de obtener la distribución de la conductividad dentro de la tubería, en base a la intensidad de corriente inyectada, el que colecta datos en forma rápida y precisa, captando pequeños cambios en la conductividad en tiempo real. el cual se realiza a una tasa de adquisición de datos de 9600 Hz mediante el programa ITS System 2000, para visualizar posteriormente en el computador (ITS, 2011). La principal ventaja de ERT es la alta tasa de frecuencia de muestreo de mediciones de resistividad eléctrica, además de ser una técnica segura y económica en comparación con las técnicas nucleares (Reinecke et al., 1998).

Para un anillo con  $N$  electrodos, consiste en  $N$  inyecciones de corriente con  $N-3$  medidas de diferencia de potencial. Considerando una equivalencia entre la inyección de corriente y las mediciones de potencial, el número de medidas independientes se reduce a  $N(N - 3)/2$ . En el caso de un anillo con 16 electrodos registran 104 valores, estos valores son usados para la reconstrucción

de un tomograma de fase de concentración dentro del sensor usando el algoritmo de reconstrucción de imagen. (Montserrat, 2012)

### 2.3.1. Algoritmo de reconstrucción

Durante años se han utilizado diversas técnicas de reconstrucción de imágenes, sin embargo, una de las más simples es la conocida como linear back-projection (LBP), la cual consiste en determinar la conductividad eléctrica que produce el diferencial de voltaje obtenida por la inyección de corriente. Este método permite reconstruir rápidamente las imágenes para visualizar la distribución de concentración de sólidos (Giguere et al, 2008). La ventaja del método LBP es que sus resultados no se ven influenciados por mediciones erróneas de resistencia, debido a que es un método lineal, por lo cual en algunos casos tiende a sobrestimar un poco las concentraciones (Giguere et al 2008b).

Las imágenes de las conductividades en la sección transversal corresponden a una grilla de 20x20 pixeles, donde algunos de esos pixeles se encuentran fuera de la superficie circular del tomógrafo, donde finalmente la imagen circular construida corresponde a 316 pixeles. La Figura 2-2 presenta de forma esquemática la grilla de reconstrucción (ITS, 2011).

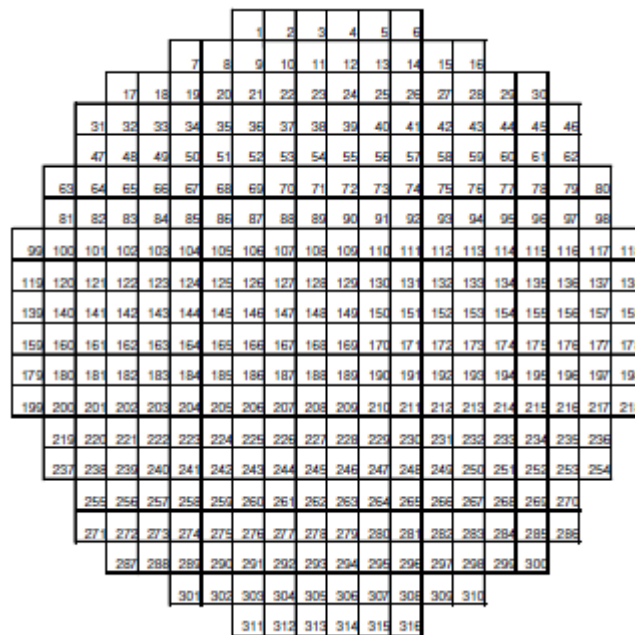


Figura 2-2: Grilla de reconstrucción de imagen (ITS, 2011).

## 2.4. Velocimetría y procesamiento de imágenes

Existe un variado abanico de métodos y dispositivos que permiten caracterizar el flujo en forma cualitativa. Esto se realiza de forma intrusiva o no intrusiva, con instrumentos de alta precisión. La medición no intrusiva puede realizarse particularmente por métodos de visualización cualitativa de diversos trazadores, tales como partículas finas, rodamina, azul de metileno, todo tipo de colorantes, partículas grandes como aislapol e incluso fruta.

El flujo puede ser caracterizado mediante instrumentos tales como tubo de pitot, molinete, láser doppler (LD), Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), entre otros. La principal desventaja es que tienen una baja resolución espacial debido a que solo se mide un punto en todo el espacio (Musalem, 1999). Por otro lado, se han implementado técnicas de procesamiento de imágenes, para la adquisición del campo de velocidades en 2D y 3D, tales como Particle Tracking Velocimetry, (PTV), Particle Image Velocimetry, (PIV) y estereoscopía (Westerweel et al., 1992; Adrian, 1991), estas técnicas de adquisición de datos no producen mayores cambios en la caracterización del flujo, ya que son técnicas no intrusivas, y se puede obtener caracterización del flujo con una alta resolución temporal y espacial.

### 2.4.1. Particle Tracking Velocimetry (PTV)

La técnica PTV tiene un enfoque lagrangiano. Se usa principalmente cuando la densidad espacial y el número de partículas traqueadoras es baja: esto ocurre cuando la distancia que recorre una partícula en un intervalo de tiempo bajo, es menor en comparación a la separación que existe entre partículas, pudiéndose de esta forma identificar la trayectoria de la partícula sin dificultad sobre cualquier sector de la imagen, con una baja probabilidad de que ocurra un traslape. Sin embargo, la principal desventaja de esta metodología es que debido a que existe una baja densidad de partículas en el espacio, los fenómenos turbulentos, como por ejemplo los vórtices de pequeña escala, no pueden ser visualizados (Westerweel et al., 1992; Ronald, 1991, Prasad, 2000).

Estos métodos han sido desarrollados en profundidad por Brevis et al. (2011), quien describe en detalle los algoritmos de detección de partículas e indica sus principales fortalezas y debilidades. La Figura 2-2 presenta un esquema del desplazamiento y densidad de partículas de dos imágenes consecutivas para la técnica PTV.

La velocidad del trazador puede ser definida por:

$$\vec{u}_i = \frac{\vec{\Delta}_i}{\Delta t} \quad (18)$$

Definida como la variación de la posición de la partícula en un tiempo determinado, donde  $\vec{\Delta}_i$  es la variación de la posición de la partícula y  $\Delta t$  es la variación temporal.

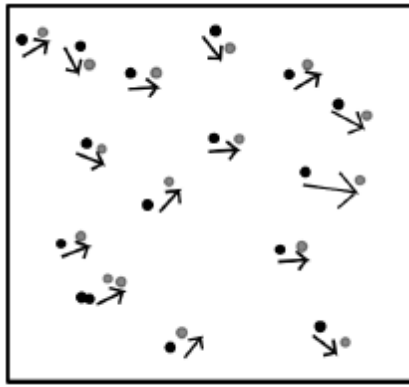


Figura 2-3: Esquema de desplazamiento de dos imágenes consecutivas, PTV. Partículas oscuras y claras representan los instantes  $t_0$  y  $t_0+\Delta t$  (Fuentes 2017).

#### 2.4.2. Particle Image Velocimetry (PIV)

La técnica PIV tiene un enfoque euleriano, se utiliza cuando la cantidad de partículas en el flujo es mayor que para la técnica PTV, y no hay traslape entre partículas. En este caso la adquisición del campo de velocidades se realiza mediante un análisis de patrones de partículas en posiciones espaciales fijas (Brevis et al. 2011).

Dada la alta presencia de partículas en el flujo, se puede tener información suficiente en cada casilla para obtener el campo de velocidad del flujo, lo que no ocurre con el algoritmo PTV. Sin embargo, cada ventana de interrogación debe tener un mínimo número de partículas para que el algoritmo funcione correctamente y los tamaños de la casilla deben ser potencias de dos ( $2^n$ ), ya que el algoritmo está basado en la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La velocidad del flujo es definida por:

$$\vec{u}_i = \frac{\overline{\Delta x_i(\vec{x}_i, t)}}{\Delta t} \quad (19)$$

En este caso se debe conocer la posición de la casilla de interrogación en dos instantes de tiempo para obtener la velocidad del flujo. La Figura 2-4 presenta un esquema del desplazamiento y cantidad de partículas para la técnica PIV.

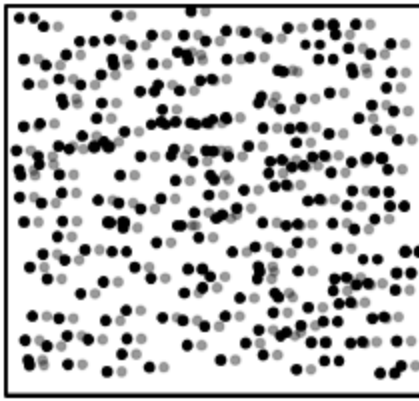


Figura 2-4 Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos, PIV. Partículas oscuras y claras representan el instante  $t_0$  y  $t_0+\Delta t$  (Fuentes, 2017).

#### 2.4.1. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes se puede procesar a través softwares como PTVlab, Digiflow, PIVlab, entre otros. El PIVlab, es un programa de código libre realizado en Matlab, que utiliza algoritmos para la detección de partículas y permite analizar los datos con los algoritmos Fast Fourier Transform (FFT) y Direct Cross Correlation (DCC). El algoritmo es de correlación cruzada, que es una medida de la similitud entre dos series en función de la diferencia entendida como una fase de ella. Se definen A y B como dos imágenes correspondientes a un tiempo  $t_0$  y  $t_0+\Delta t$  respectivamente, donde cada imagen se divide en casillas de interrogación, que corresponden a sub-imágenes, donde cada casilla de interrogación A se correlaciona con su casilla B correspondiente, generando de esta forma una matriz de correlación cuyo peak representa la posición del vector desplazamiento. Este algoritmo fue implementado por Thielicke y Stamhuis (2014).

#### 2.4.2. Caracterización del flujo y Resultados PIV-Fuentes 2017

A continuación, se presenta un resumen de los resultados de velocimetría obtenidos mediante PIV. Dado que en esta investigación se trabajó en la misma instalación experimental, con los mismos caudales, las mismas características del lecho de grava que en la investigación de Fuentes (2017) y considerando que la turbulencia es ergódica podemos asumir que los campos de velocidades medidos por Fuentes (2017) son representativos para esta investigación.

##### 2.4.2.1. Intensidad de la turbulencia

La Figura 2-5 presenta los resultados experimentales de las intensidades turbulentas medidas por Fuentes (2017). Los resultados fueron comparados con las expresiones semiteóricas de la intensidad de turbulencia de Nezu y Nakagawa (1993) y Kironoto y Graf (1994). Se observa que los resultados se ajustan de buena manera a todos los planos medidos experimentalmente que correspondientes a  $u_p/u_*$  a partir de 0.15, donde  $u_p$  y  $u_*$  corresponden a la velocidad en la dirección del flujo y la velocidad friccional, respectivamente. Por otro lado, el perfil  $v_p/u_*$  es

sobrestimado por las expresiones semiteóricas, donde  $v_p$  es la velocidad en la componente vertical del flujo.

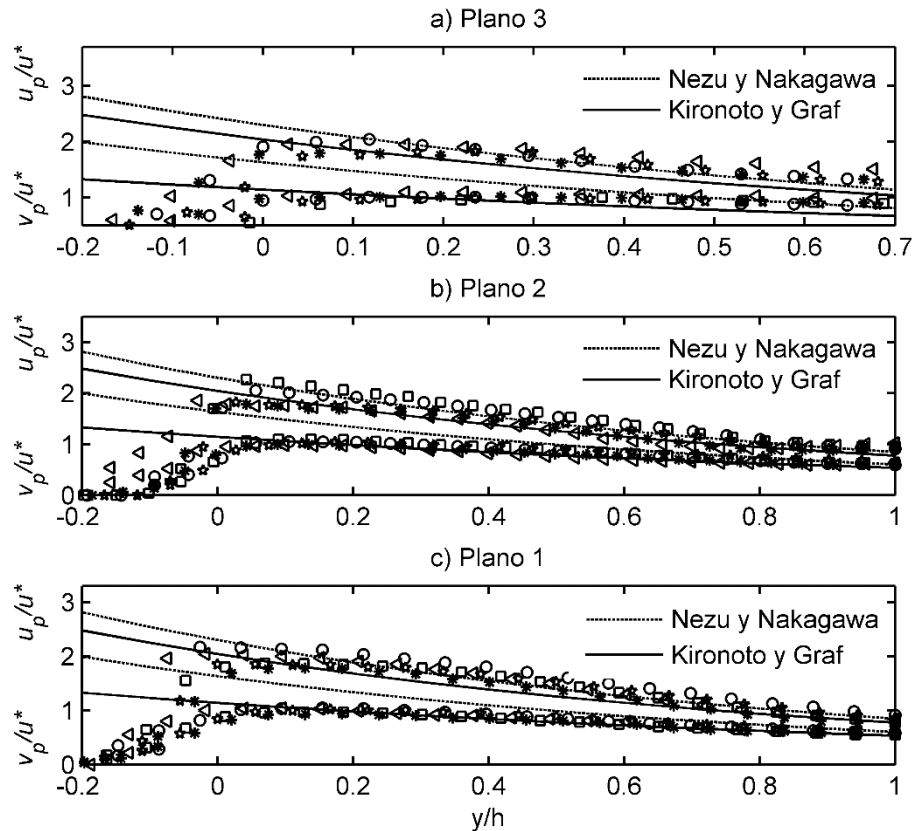


Figura 2-5: Perfiles de la intensidad de turbulencia  $u'$  y  $v'$  con las expresiones de Nezu y Nakagawa(1993) y Kironoto y Graf (1994).

#### 2.4.2.2. Esfuerzo de corte experimental (PIV)

La Figura 2-6 muestra los esfuerzos de corte de Reynolds para los tres planos de medición y puede observarse que el esfuerzo de corte para cada plano tiene el comportamiento de un flujo bidimensional sobre un lecho rugoso (Nikora y Goring 2000; Czemuszenko 2011). Nótese que el esfuerzo de corte máximo se alcanza a  $0.1y/h$  sobre la cresta de la rugosidad más elevada, reduciéndose más cerca del lecho. Donde  $h$  es la altura de la lámina de agua.



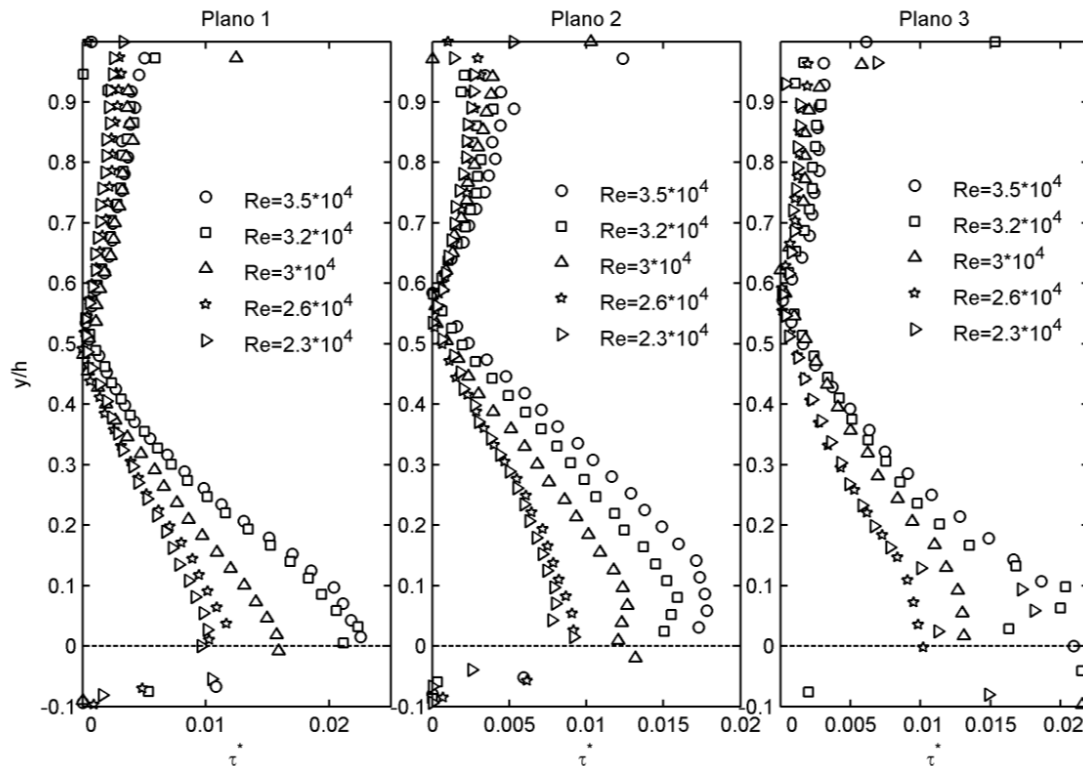


Figura 2-6: Perfiles de esfuerzo de corte de Reynolds total adimensionalizado en los planos 1,2 y 3 (Fuentes, 2017).

Según Nikora y Goring (2000) el límite de la capa rugosa se ve reflejado a través del valor máximo del esfuerzo de corte. Además, la reducción del esfuerzo de corte cercana al lecho se debe a mecanismos de extracción de momentum asociados con la heterogeneidad espacial de las condiciones medias del flujo en torno al lecho, esto visto en la literatura principalmente por, Nikora et al (2001), Nikora et al. (2004), Czernuszenko (2011), Florens et al (2013). Se consideran que los resultados son válidos solo hasta un  $0.1-0.25 d_s$ , que es donde está la rugosidad física determinada.

# Capítulo 3 Metodología experimental

### 3.1. Instalación experimental

La instalación experimental consiste en un sistema cerrado de tuberías o “loop”, por donde escurre una muestra sólido-líquida sobre un lecho de grava dispuesto en su interior.

La Figura 3-1 muestra la instalación experimental utilizada en esta investigación, el sistema consta de una tubería se divide en 2 tramos, el primero, compuesto por 8 m de tubería de PVC Sanitario, el semicírculo inferior de la sección transversal es una placa de acrílico que sella la parte inferior, dejando, así como área disponible para el transporte de flujo el semicírculo superior. Sobre la placa hay una capa de grava que simula la rugosidad del lecho. El segundo tramo se encuentra compuesto por 2 m de tubería de acrílico transparente, el que posee en su interior un lecho de grava inmóvil de  $D_{50}=1.02$  cm, el que cubre la tubería hasta su altura media de la sección, tal como se muestra en la Figura 3-2. Adicionalmente el tramo 2 se puede subdividir en 4 tramos desmontables de 30 cm cada uno. Por otro lado, el sistema de impulsión está compuesto por una bomba modelo Ebara DWO150, el cual se conecta a las tuberías mediante 10 metros de manguera de 2 pulgadas de diámetro el cual posee un tubo de Venturi, con manómetro de tablero. El agua se abastece mediante un estanque de PVC cilíndrico de 200 litros.

El círculo rojo en la Figura 3-2 muestra la ubicación del tomógrafo resistivo, que es el sistema de adquisición de datos de concentración.

La adquisición de datos se realizará en el tramo 2 ya que, al ser transparente, permite la visualización del flujo y de las partículas finas.

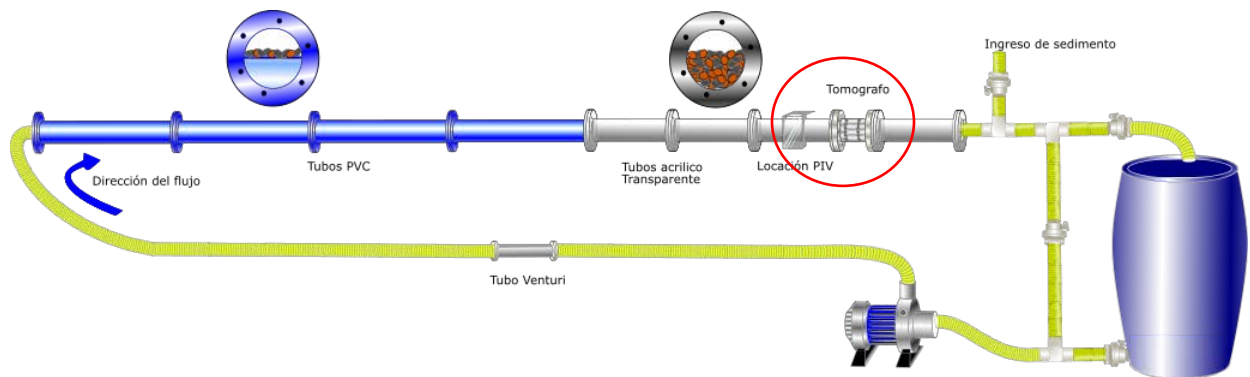


Figura 3-1: Montaje experimental (Fuentes 2017).

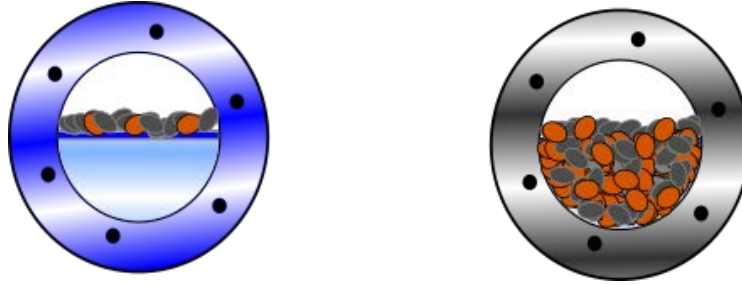


Figura 3-2 a):Sección transversal tuberías en tramo de PVC b)acrílico respectivamente (Fuentes 2017).

### 3.1.1. Bomba

Para realizar la impulsión del fluido se utiliza una bomba centrífuga de acero inoxidable marca EBARA, modelo DWO 150/M, de 1.5 HP, 220 V, de 2". La bomba es capaz de elevar fluido con partículas en suspensión hasta de 19 mm de diámetro. En la Tabla 3-1 se observa una curva de descarga provista por el proveedor de la bomba.

Tabla 3-1: Curva de operación de bomba

Q (l/s)	H (m)
10.7	9.5
3.3	8.9
5.0	7.9
6.7	6.9
9.2	5.1

### 3.1.2. Tomógrafo resistivo

Para medir la concentración del relave se cuenta con un tomógrafo resistivo con un sistema de adquisición de datos (DAS). Mediante 2 anillos de electrodos ubicados en el perímetro del dispositivo, el que mediante la diferencia de voltaje generada previa inyección de corriente es capaz de medir la concentración en tiempo real. El tomógrafo utilizado es de la Marca ITS,

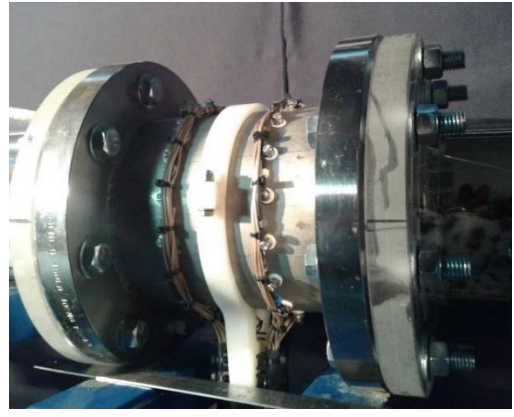
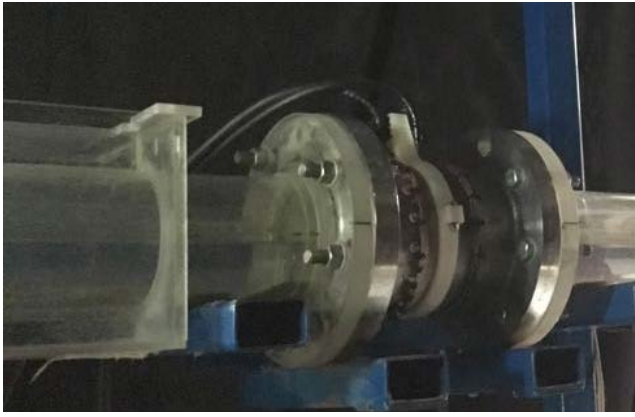


Figura 3-3a, de 0.127 m de diámetro. Los planos de los electrodos distribuidos en el perímetro del instrumento son presentado en la Figura 3-3b. Además del sistema de adquisición de datos Modelo p2+ con 2 canales de sensores de dimensiones 37.4x30x17 cm, de 10 kg de peso, es presentado en la Figura 3-5.

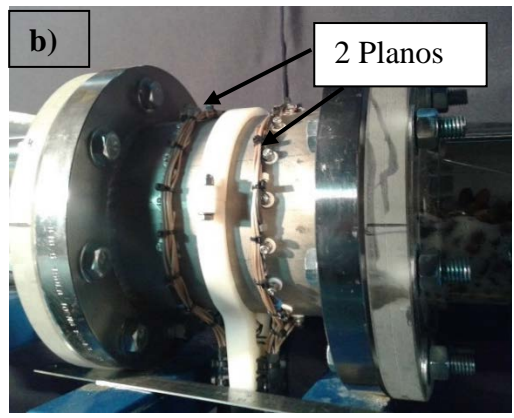
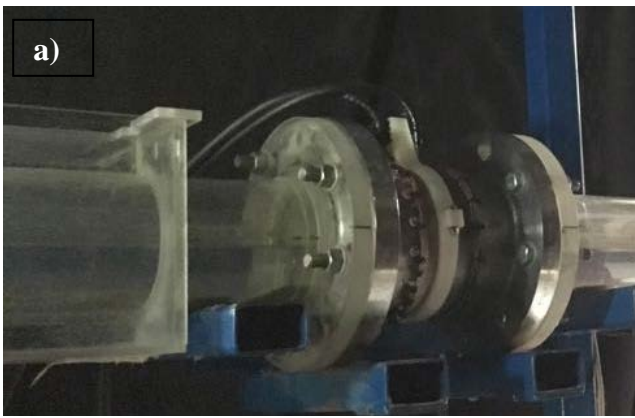


Figura 3-3: Instalación experimental del tomógrafo a) Tomógrafo resistivo b) Planos de medición

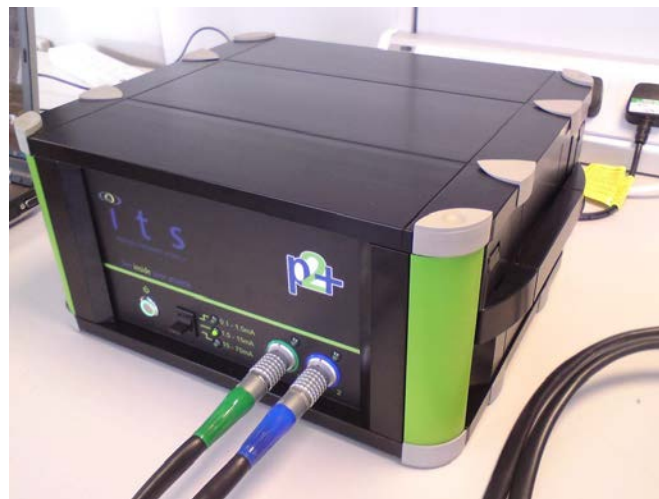


Figura 3-4: Sistema de adquisición P2+.(ITS,2013).

En algunos casos la presencia de pequeñas burbujas dentro de la tubería puede ser inevitables, sin embargo, la presencia de aire en la parte alta de la tubería puede ser tomado por el tomógrafo como un gradiente de concentración.

### 3.1.3. Cámara Gopro

Se utiliza una cámara Gopro Hero 3 para grabar los experimentos, las que tienen la capacidad de grabar videos a 60 fps a una resolución de 720x720 pixeles<sup>2</sup>.



Figura 3-5: Cámara Gopro Hero 3.

## 3.2. Calibración del Tomógrafo

El tomógrafo tiene un sistema de autocalibración a través del DAS, que consiste en ajustar el rango de inyección de corrientes hasta que la serie de datos de 16 términos denominados GAIN MAP sea simétrico. El DAS es el encargado de controlar la frecuencia, la cantidad de corriente inyectada y el algoritmo de reconstrucción de la imagen.

La calibración se realiza con la fase conductiva presente en su interior, es decir se realiza con el montaje experimental armado, procediendo a recircular agua limpia a través del experimento, previa limpieza de este, evitando la presencia de sedimentos y burbujas en su interior, donde el rango de inyección de corriente que se obtuvo mediante la calibración es de 51.47 mA, que es con el cual se efectúan los experimentos.

Previo al inicio de cada experimento se hace necesario tomar un tomograma de referencia, el cual representa el momento inicial de la toma de datos, con el cual posteriormente se comparará con los datos colectados en el experimento. La referencia representa la diferencia de voltaje o concentración obtenida dada una inyección de corriente en un intervalo de tiempo.

Dado que el presente estudio desea abordar las concentraciones de relave y grava, se utilizaron dos escenarios para obtener referencias de los experimentos. El primero mide las concentraciones en función de una referencia que solo posee agua y no considera grava (Referencia W), el otro escenario es utilizar una referencia que posea agua y grava en el lecho (Referencia WG), donde el primero mide la concentración conjunta de la grava y el relave, mientras que el segundo solo mide la concentración del relave en el lecho.

La referencia W la obtenemos utilizando solo el tomógrafo, instalando una tapa a cada extremo de este, posteriormente se ingresa agua limpia al tomógrafo y se realiza la medición durante unos 2 minutos aproximadamente, si las variaciones de los datos colectados y la referencia es inferior a un 0.3%, se asume como satisfactoria la referencia. Esta referencia colectada es utilizada para todos los experimentos de este trabajo.

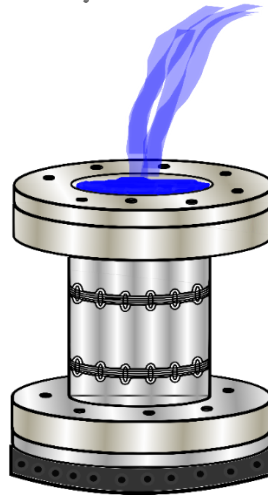


Figura 3-6: Esquema referencia W.(Fuentes, 2017)

La referencia WG se realiza con el tomógrafo instalado en el montaje experimental, con el lecho de grava en su interior. Posteriormente se hace recircular agua limpia sin sedimentos ni burbujas, y se procede a coleccionar los datos durante unos 2 minutos. La referencia será válida cuando la variación de los datos coleccionados sea inferior a 0.3%. Para cada experimento, en particular, se deberá realizar una calibración para la referencia WG, esto debido a que las distribuciones de las gravas en el lecho cambian de posición entre un experimento y otro, siendo de esta forma referencias independientes unas de otras.

### 3.2.1. Calibración de tomógrafo para Sedimento en el lecho

Para evaluar el comportamiento del relave y la grava en conjunto, se realiza la calibración de la siguiente forma: primero, el tomógrafo se dispone en forma horizontal con el lecho de grava en su interior, se instalan las tapas de acrílico en sus dos extremos; y una de sus tapas posee un orificio por el cual se conecta una manguera para el ingreso de agua limpia, posterior a esto se realizan los siguientes pasos:

- Se limpia el tomógrafo con el fin de eliminar cualquier sedimento que genere una mala lectura.
- Se tapan los extremos del tomógrafo y se procede a llenar el dispositivo de agua, hasta que el tomógrafo se encuentre completamente lleno de agua.

- Se eliminan las burbujas que se puedan generar, inclinando el tomógrafo, para que se puedan ir por la manguera.
- Una vez el tomógrafo se encuentre lleno de agua y sin burbujas se procede a coleccionar datos y así obtener la referencia de agua. Se considera que la referencia es aceptable cuando el error es menor a 0.3%.

Posteriormente se realiza la calibración, donde se incluye el lecho de gravas, y se desarrolla como se indica a continuación:

- Con el tomógrafo limpio, se procede a colocar una de las tapas.
- Por la sección abierta se introducen las gravas correspondientes al lecho, las que deben cubrir la mitad inferior del tomógrafo.
- Se instala la tapa en la sección abierta, y se distribuye en forma homogénea las gravas a fin de que cubra toda la mitad inferior del tomógrafo.
- A continuación, se procede a incorporar el agua limpia al tomógrafo hasta llenarlo, eliminando las burbujas, tal como se indicó en las etapas anteriores.
- Se procede a coleccionar datos y así obtener la referencia de agua-grava. Considerar que la diferencia entre la referencia WG y lo medido sea inferior a 0.3%
- Se agregan al tomógrafo 80 cc de relave en forma homogénea a lo largo de todo el tomógrafo, los cuales son pesados previamente.
- Se realiza la medición mediante el DAS, coleccionando 100 tomogramas aproximados, correspondientes a la concentración del sedimento durante 1 minuto.
- Se repiten los dos pasos anteriores hasta alcanzar los 240 cc de relave incorporados al tomógrafo.

### **3.3. Calibración Tomógrafo sedimento de fondo**

La Figura 3-6 presenta la calibración del sedimento de fondo, se relacionaron los datos coleccionados de las concentraciones en el lecho mediante la referencia W y la Referencia WG. La abscisa corresponde a la concentración medida mediante la referencia agua grava y la coordenada corresponde a la concentración tomada mediante referencia agua. Las concentraciones medidas con la referencia WG equivalen, en promedio, a un 5% de la concentración media con la referencia W. La concentración igual a 39.08% representa a la concentración estimada de la grava. La curva de calibración obtenida por este método tiende a subestimar la concentración real del sedimento depositado. Por tal motivo se realiza la calibración con los datos experimentales.



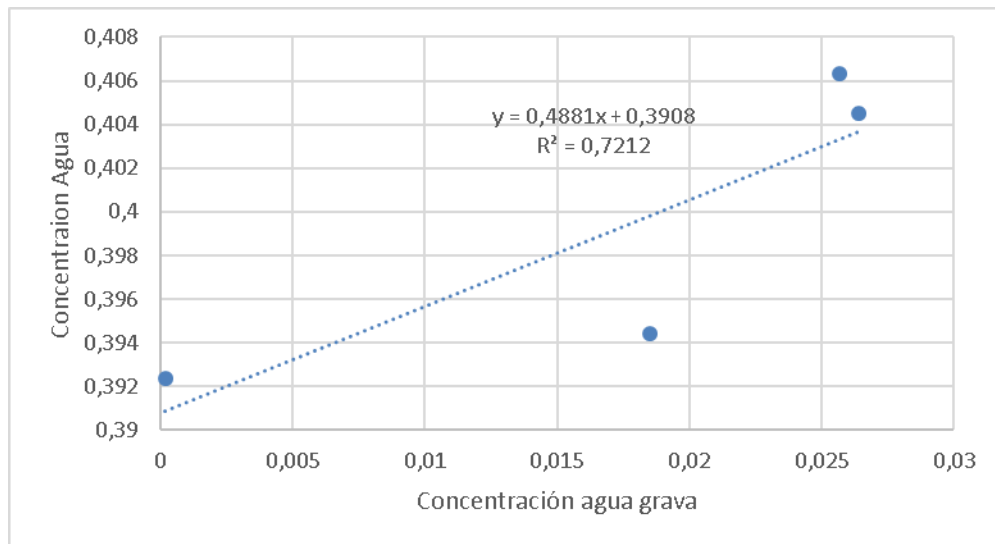
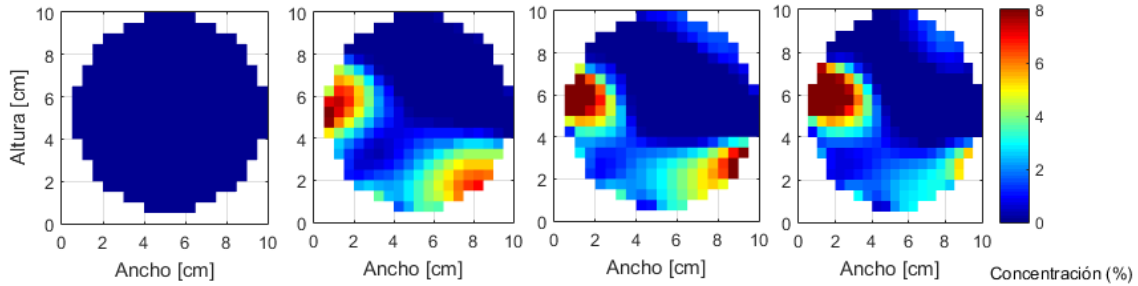
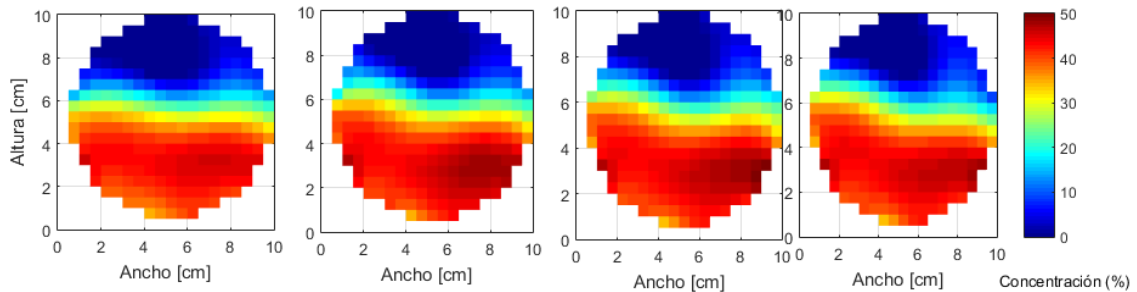


Figura 3-7: Comparación de las concentraciones promedio en base a referencia W y WG.

La Figura 3-8a, presenta los tomogramas de calibración para las referencia WG, cada tomograma muestra el relave incorporado al tomógrafo en forma manual y medido en situación estática con el tomógrafo lleno de agua, siendo el tomograma de la izquierda el caso sin sedimento y los siguientes son a los que se les incorpora relave de forma gradual en rangos de 80 cc, hasta llegar a 240 cc de relave. En el caso de la Figura 3-8a se observan con referencia agua-grava(WG), donde el color azul implica ausencia de sedimento, y a medida que se incorpora relave al tomógrafo, el tomograma va cambiando de color, mostrando su ubicación y concentración de relave dentro de la tubería, mientras que en la Figura 3-8b se observan los tomogramas con referencia agua (W), donde el estado iniciales es la concentración de grava, sin embargo, el incremento de concentración asociado al relave es mínimo o visualmente no es muy notoria.



a. Tomogramas con referencia WG colectados durante la calibración.

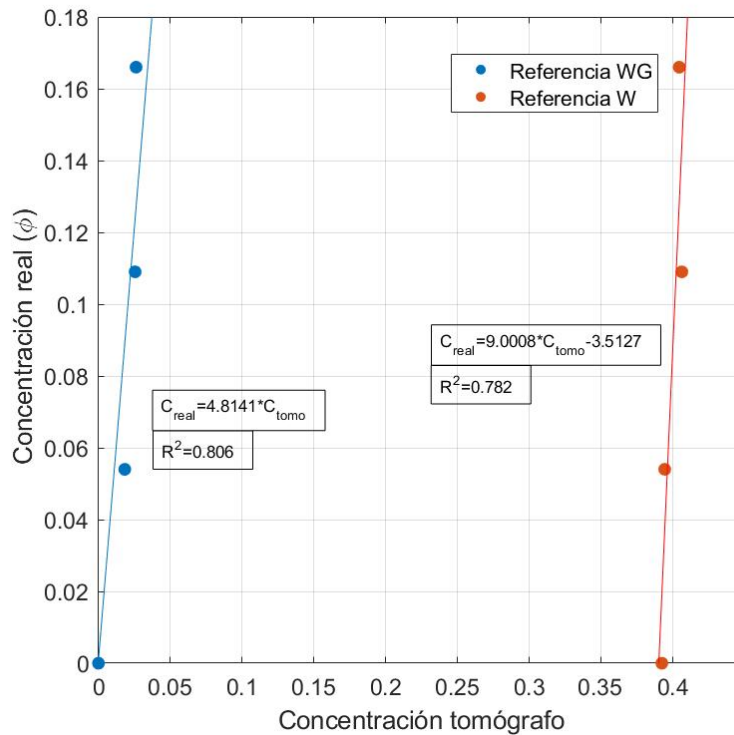


b. Tomogramas con referencia W colectados durante la calibración.

Figura 3-8. Tomogramas colectados durante la calibración del relave y relave y grava, aumentando su concentración gradualmente hacia la derecha.

Ahora bien, analizando en términos numéricos, se observa que en el caso de la calibración con referencia WG, si bien aumenta la concentración en el fondo en sectores puntuales, este no es capaz de medir adecuadamente la interfaz del lecho de grava.

La Figura 3-9 representa la calibración del tomógrafo, con los datos W y WG. Los valores representados como concentración real corresponden a la concentración de relave en volumen depositado en el lecho de grava durante los experimentos. En el caso de los valores asociados a concentración medida con el tomógrafo, estas corresponden a la concentración en volumen medida por el tomógrafo mediante su DAS. Además, se observa que la concentración de la grava obtenida mediante tomógrafo sobreestima hasta en un 10%, dado que el tomógrafo estima que la concentración de la grava sin interferencia de partículas es cercana a un 38%, lo cual difiere de la concentración de la grava real que es de un 28%.



7,

Figura 3-9: Calibración Tomógrafo. Comparación de la concentración de relave utilizando la referencia W y Referencia WG.

### 3.4. Calibración del tomógrafo para el caso de sedimento en suspensión

Para realizar la calibración del tomógrafo con el relave en suspensión, se hace necesario tener el montaje experimental armado en su totalidad, con el cual se pone a funcionar el sistema cerrado con agua, con la misma metodología de un experimento tradicional. Una vez generada la referencia del experimento se procede a introducir un volumen conocido de relave al sistema cerrado, durante un tiempo determinado se espera a que las partículas que deben sedimentar sedimenten en su totalidad, luego de transcurrido este tiempo solo quedan las partículas en suspensión.

Cuando quedan solo las partículas en suspensión se toman datos con el tomógrafo generando aproximadamente unos 200 tomogramas a una frecuencia de 9600 Hz, con los cuales se obtiene la concentración en suspensión promedio medida por el instrumento. A su vez tomaremos una muestra de agua con las partículas en suspensión de un volumen conocido para determinar la concentración real del experimento. Este procedimiento se realiza para cuatro volúmenes diferentes de relave incorporados al sistema, siendo estos 1.5, 3, 3.5 y 4.0 l de relave seco.

Una vez obtenidas las 4 muestras en los recipientes de vidrio se trasladan al Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde se realiza el análisis de concentración de sedimentos de las muestras tomadas experimentalmente, implementando el método del peso seco. La Figura 3-10 presenta el montaje para la medición de concentración en suspensión de las muestras. Este método consiste en filtrar

las muestras a través de filtros de Boro-Silicato, marca ADVANTEC con porosidad de  $0.5\mu\text{m}$ . La filtración se realiza mediante un sistema de bombeo que genera un vacío, el cual está compuesto por una bomba de vacío, Matraz Kitazato, Porta filtro, embudo filtrado y sistema de mangueras.

Posterior al filtrado los sedimentos en suspensión que quedan atrapados en el filtro con una baja humedad, y es secado a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora, con la cual se obtiene la masa de las partículas sólidas filtradas más la masa del filtro, el cual fue pesado previamente.

La muestra se pesa en una balanza analítica de alta precisión marca Sartorius, precisión de  $0.0001\text{ gr}$  con un error de  $\pm 0.00005\text{ gr}$ . Así se obtiene la masa de las partículas sólidas de relave en suspensión y a su vez determinar la concentración promedio en suspensión de cada experimento.



Figura 3-10: Instalación de filtración para determinar masa de sedimento.

La Figura 3-11 representa las concentraciones medidas en suspensión mediante el tomógrafo, y las concentraciones en suspensión real, donde  $C_{real}$  es la concentración medida mediante método del peso seco y  $C_{tomo}$  corresponde a la concentración medida por el tomógrafo.

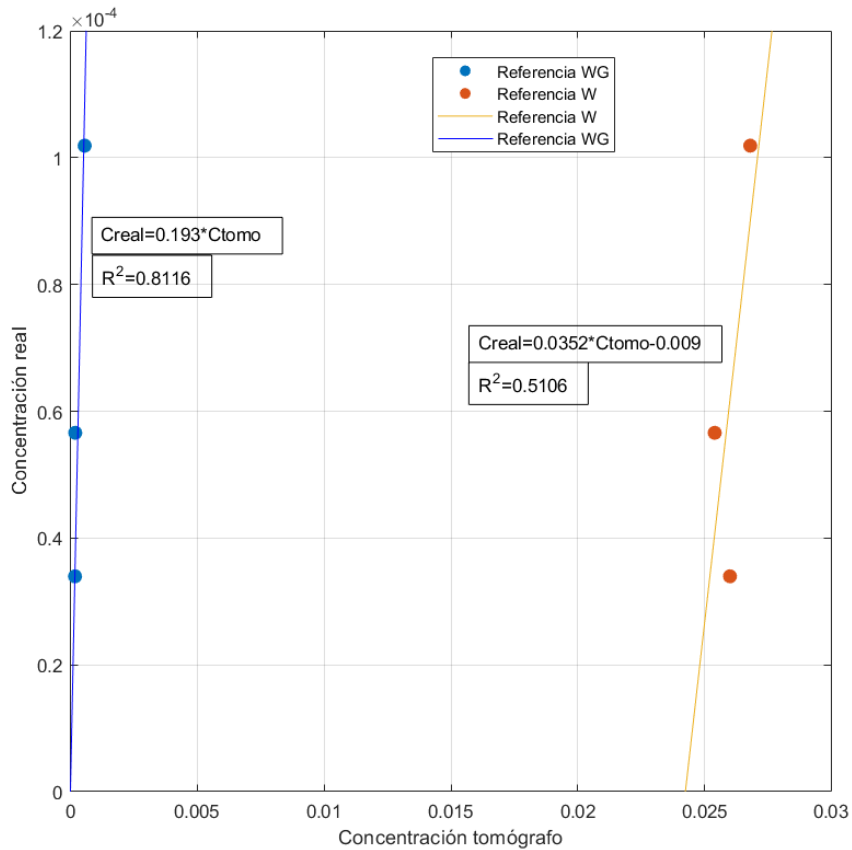


Figura 3-11: Calibración tomógrafo. Comparación de la concentración de relave en suspensión utilizando la referencia W y referencia WG.

### 3.5. Granulometría relave y grava

Las granulometrías del sedimento fino se realizaron mediante el uso del láser MasterG-2000 del departamento de Geología de la Universidad de Chile. La Figura 3-12 presenta una imagen del equipo Laser Master G-2000, con el cual se logra obtener la granulometría de las partículas de relaves.



Figura 3-12: Laser MasterG-2000.

La Figura 3-13 presenta la distribución granulométrica de la muestra de relave y la grava donde se observa que el diámetro medio,  $D_{50}$ , del relave es de 191.466  $\mu\text{m}$  y el de la grava  $D_{50}$ , es de 10.2 mm. Nótese que el relave tiene un tamaño medio del orden de las arenas finas.

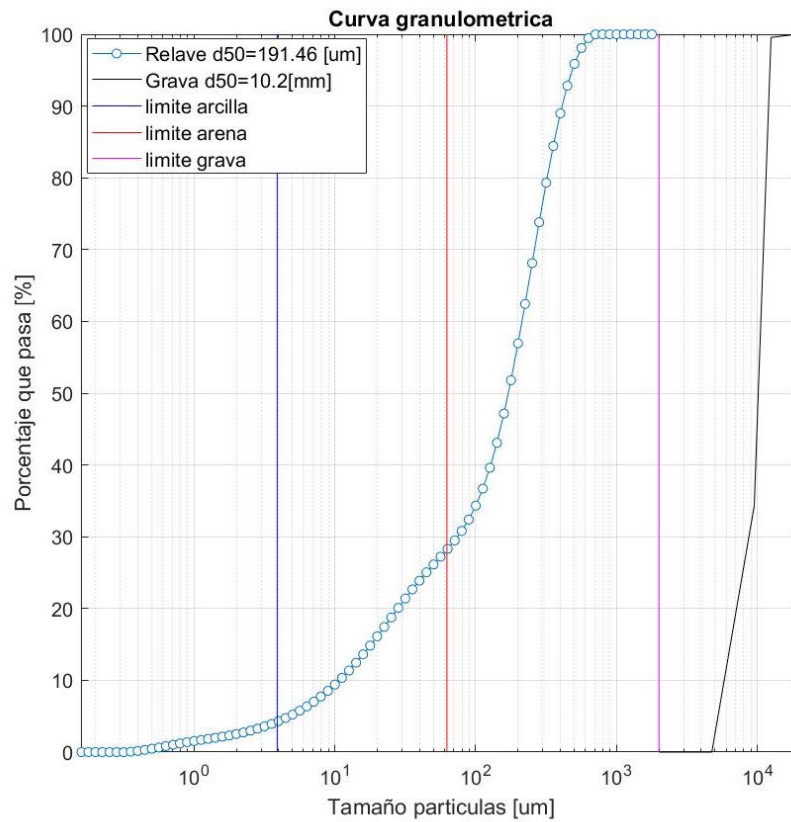


Figura 3-13: Granulometría relave y grava.

La Tabla 3-2 presenta los diámetros característicos del sedimento,  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ , tanto del relave como de la grava.

Tabla 3-2: Diámetros característicos del sedimento

Muestra	$D_{10}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{90}$ (mm)
Relave	0.121	0.191	0.460
Grava	5.800	10.200	11.900

Se observa que para  $D_{50}$  las partículas de grava son al menos 53 veces más grandes que las partículas de relave.

### 3.6. Ensayo de densidad máxima y mínima

Para medir las densidades del relave se utiliza el “Método Japonés”. Para la densidad máxima de la muestra, se vierte en un recipiente una muestra seca y se dan 100 golpes por cada capa, se completa un total de 10 capas, luego se pesa y se repite el procedimiento 3 veces.

Para el caso de la densidad mínima se toma la muestra y se vierte en un molde con ayuda de un embudo, lentamente, en forma de espiral, desde afuera hacia adentro, de acuerdo a la Norma ASTM2454, una vez lleno el molde, se retira el exceso de sedimento cuidadosamente y se pesa, esto se repite 3 veces, donde la menor densidad es la que corresponde a la densidad mínimas del sedimento.

Los instrumentos utilizados para determinar las densidades de relave mediante el Método Japonés son presentados en la Figura 3-14. Dentro de los instrumentos que se observan se encuentran la balanza, recipiente o molde contenedor y cilindro para golpes.

Cabe mencionar que el molde posee dimensiones conocidas que son presentadas en Tabla 3-3, por lo que para obtener la densidad solo basta dividir el peso obtenido por el volumen del molde, los valores de las densidades son presentadas en la Tabla 3-3.



Figura 3-14: Instrumentos utilizados para método Japonés.

Tabla 3-3: Densidades del relave usado en los experimentos según el método japonés

Muestra	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (grs)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	7.07	3.6	116.21	1614.9
2	7.07	3.6	119.7	1663.4
3	7.07	3.6	118.11	1641.3

Muestra	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (grs)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	7.07	3.6	96.73	1344.2
2	7.07	3.6	96.41	1339.8
3	7.07	3.6	96.73	1344.2

Para efectos de este estudio se considera como densidad del relave 1501.6 kg/m<sup>3</sup>, que corresponde a la densidad promedio entre la densidad máxima y la densidad mínima del relave.



# Capítulo 4 Resultados Experimentales

#### 4.1. Resultados Tomógrafo

Se realizó un total de 16 experimentos, divididos según dos parámetros, el volumen de relave ingresado al sistema y el caudal circulante por el sistema cerrado. Se consideraron volúmenes de 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 l de relave minero, los cuales son incorporados a 4 caudales distintos del flujo, siendo estos 1.81, 1.96, 2.13 y 2.26 l/s. Con el objetivo de estudiar el gasto sólido de fondo y el gasto sólido en suspensión se realizaron mediciones con el tomógrafo, el que fue calibrado para cada experimento.

#### 4.2. Granulometría depositada

Se realizaron muestreos del relave depositado en el lecho en la dirección del flujo para cada tramo de la zona de estudio, para los experimentos con volumen de relave de 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 l. La zona de control se subdividió en 5 tramos, los cuales consideran 4 tramos de tubería transparente de 0.3 m de longitud y 0.10 m. de diámetro, y un tramo de depositación donde se encuentra el tomógrafo. La Tabla 4-1 presenta los parámetros  $V_{tot}$  y  $\phi_{real}$ , donde  $V_{tot}$  representa el volumen total de relave de la muestra y  $\phi_{real}$  es la concentración obtenida desde la posición del tomógrafo una vez terminado el experimento, obtenido manualmente, el relave es retirado de la sección del tomógrafo donde es pesado y medido su volumen.

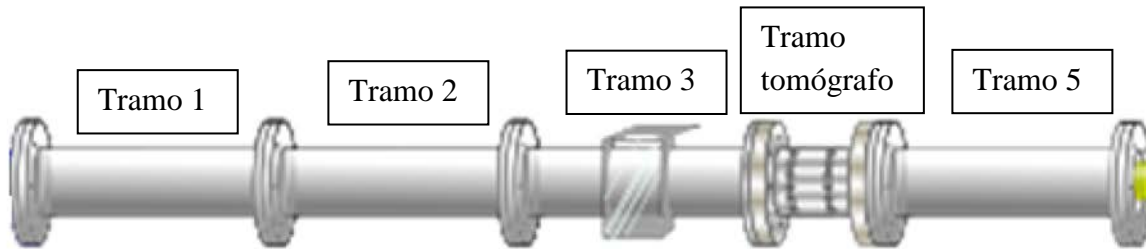


Figura 4-1: Ilustración tramos de instalación experimental.

Al analizar la Tabla 4-1 se observa que las mayores concentraciones obtenidas en el lecho se generan cuando los caudales son mayores y el sedimento vertido es mayor.

Tabla 4-1: Resumen de volumen de relave ingresado al sistema y la concentración real obtenida en la sección del tomógrafo.

$Q_t$ [l/s]	$V_{tot}$ [l]	$\phi_{real}$
1.81	1.5	10.6%
	2.0	11.3%
	2.5	13.1%
	3.	15.4%
1.96	1.05	7.9%
	2.0	4.8%
	2.5	15.1%
	3.0	15.4%
2.13	1.5	10.9%
	2.0	11.3%
	2.5	12.8%
	3.0	15.3%
2.26	1.5	10.7%
	2.0	8.8%
	2.5	12.9%
	3.0	16.3%

La Figura 4-2 presenta la distribución de la depositación a lo largo de cada tramo de cada experimento, donde  $V_{lecho}/V_{tot}$ , representa el volumen acumulado por tramo de estudios,  $V_{lecho}$ , sobre el volumen total depositado en la tubería de control,  $V_{tot}$ , una vez terminado cada experimento,  $X_*$ , representa la adimensionalización de la longitud por tramo, sobre la longitud total.

Para volúmenes de relaves bajos, es decir 1.5 y 2.0 l incorporados al sistema, la depositación es mayor en los primeros tramos, sin embargo, para  $X_*$  mayor a 0.77 los volúmenes de depositación disminuye en el orden del 10%. Mientras que, para volúmenes de relave mayores, 2.5 y 3.0 l, la depositación se distribuye de manera homogénea a lo largo de la tubería.

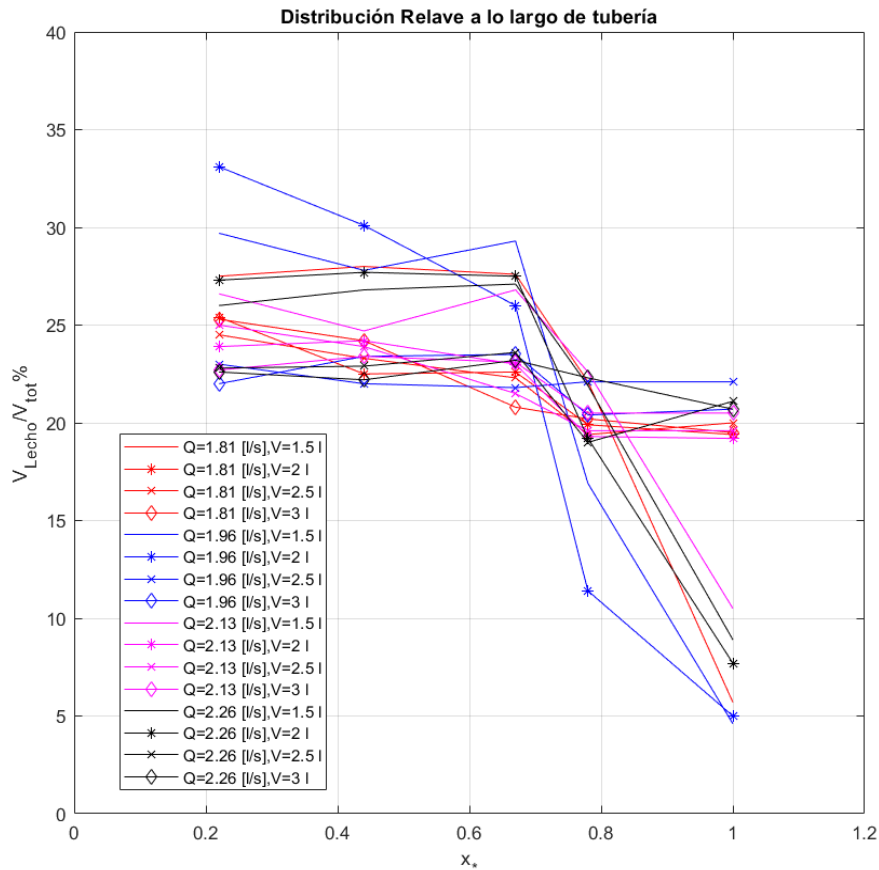


Figura 4-2 Distribución de relave depositado por tramo con respecto al depositado en toda la sección.

Por otro lado, la Tabla 4-2 y Tabla 4-3 presentan los diámetros característicos  $D_{50}$  y  $D_{90}$ , para cada tramo de estudio, del relave vertido para el volumen de 2.5 l, respectivamente. Adicionalmente, se resaltan en negrita los valores donde se depositaron las partículas de mayor tamaño asociado a  $D_{50}$  y  $D_{90}$ .

Acorde a la Tabla 4-3 se observa que las partículas de mayor tamaño, mayor  $D_{90}$ , fueron depositadas en el tramo 2 de la tubería, a excepción del experimento con velocidad de flujo menor, donde las partículas de mayor tamaño fueron depositadas en el tramo 1. Se puede concluir que la depositación es rápida en los experimentos, dado que la depositación de las partículas de mayor tamaño ocurre principalmente en los primeros tramos de estudio, asociado a el  $D_{90}$  de las granulometrías realizadas.

Tabla 4-2: D<sub>50</sub> relave depositado por tramo de la tubería.

Volumen (l)	Velocidad media del Flujo (m/s)	D <sub>50</sub> (μm)				
		Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo Tomo	Tramo 4
2.5	0.442	283.65	<b>328.28</b>	297.8	236.99	298.12
	0.417	343.88	<b>407.08</b>	346.16	317.99	332.25
	0.385	348.13	<b>430.67</b>	259.51	417.73	258.43
	0.355	352.09	328.60	365.46	<b>401.05</b>	347.63

Tabla 4-3: D<sub>90</sub> relave depositado por tramo de la tubería.

Volumen (l)	Velocidad media del Flujo (m/s)	D <sub>90</sub> (μm)				
		Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo Tomo	Tramo 4
2.5	0.442	517.49	<b>627.70</b>	535.77	447.85	557.79
	0.417	611.62	<b>855.59</b>	638.81	578.01	607.80
	0.385	584.96	<b>758.52</b>	476.54	686.46	480.4
	0.355	<b>763.39</b>	588.80	674.08	723.50	633.76

### 4.3. Estratigrafía

### 4.4. Series de tiempo lecho

Las Figura 4-3 - Figura 4-6 representan las concentraciones promedio de relave depositado en el lecho de la tubería en la sección del tomógrafo a lo largo del tiempo. Con periodos de observación de 10 minutos, por un lapso de tiempo aproximado de 3 horas, que es el tiempo en que las concentraciones en el lecho se estabilizan. En el caso de 3.0 l se realizaron experimentos por un período mayor de tiempo, debido a que fueron los primeros experimentos realizados, a fin de tener una extensión mayor de datos para posteriormente definir el tiempo adecuado de medición para los siguientes experimentos.

De forma cualitativa podemos afirmar que la referencia agua-grava (*WG*) representa de mejor forma la concentración del relave en el lecho, tal y como lo muestran las Figuras 4-13 – Figura 4- 16, debido que es más sensible a los cambios de concentraciones, mientras que la serie de tiempo con referencia solo agua (*W*), es menos sensible a los cambios de concentraciones debido a que los resultados representados por esta referencia se encuentran asociados a las concentraciones de la grava y el relave en conjunto, por lo que se pierde la sensibilidad al querer enfocarnos sólo en el relave, dado que los cambios de concentración son bajos, ya que la influencia de la grava que no permite visualizar grandes cambios en la concentración del relave.

Para la serie de tiempo con referencia agua-grava, se observa que las concentraciones van aumentando en el tiempo hasta alcanzar una concentración de equilibrio. A mayor volumen de relave ingresado al sistema, la estabilización de la concentración en el lecho alcanza su equilibrio más rápidamente que para volúmenes más bajos.

Para número de Reynolds bajo se observa que las partículas de relave demoran más tiempo en llegar a la zona del tomógrafo, por lo cual alcanzan la concentración de equilibrio se alcanza más lentamente que para Reynolds más altos. Adicionalmente a mayor volumen de relave vertido la concentración de equilibrio se alcanza en un menor tiempo.

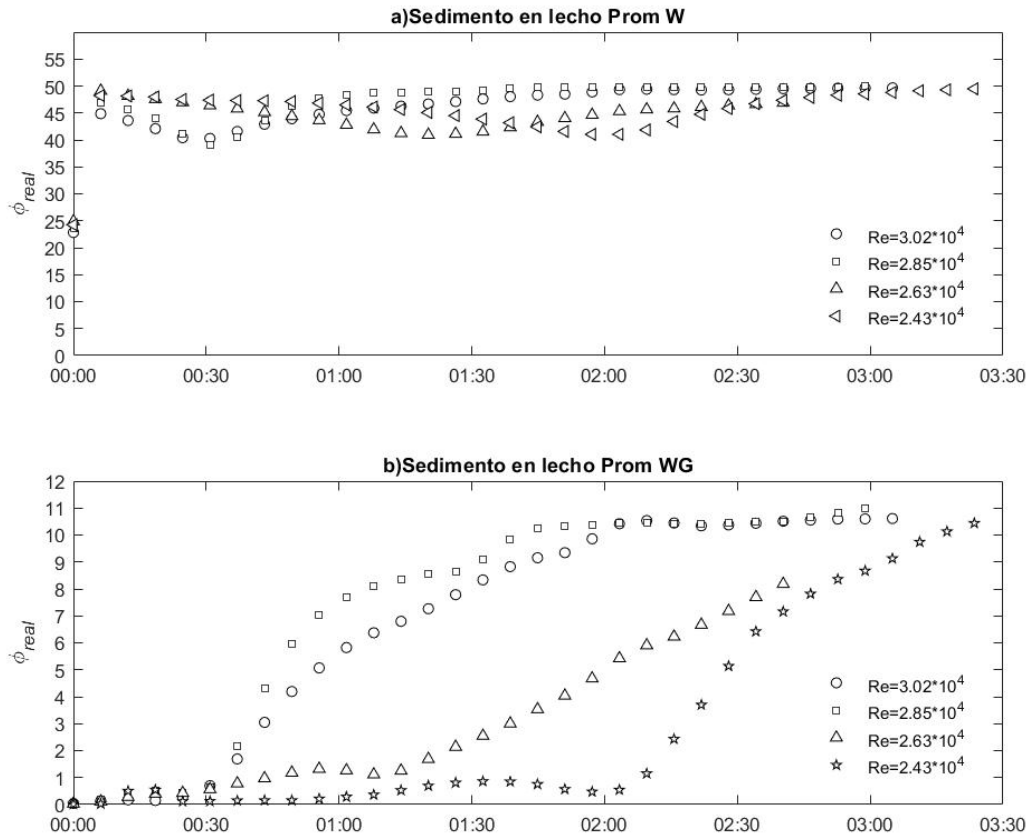


Figura 4-3: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 1.5 l.

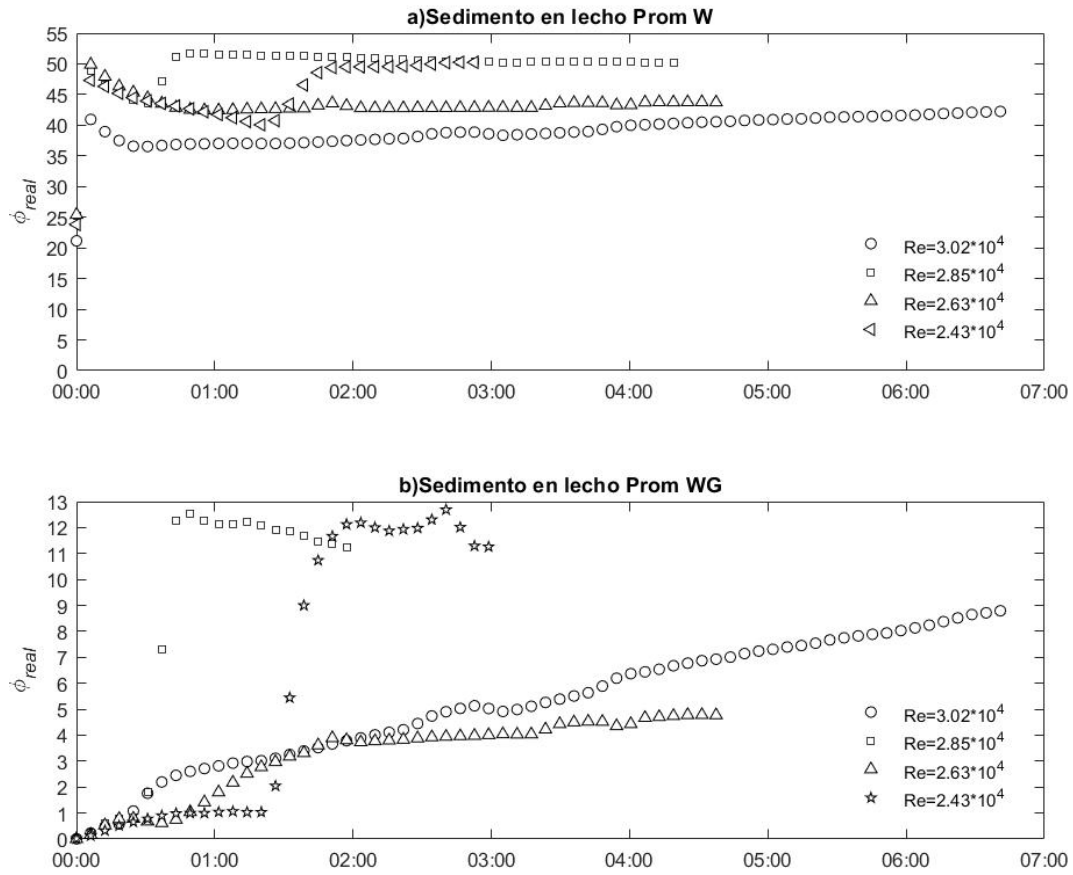


Figura 4-4 Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 2.0 l.

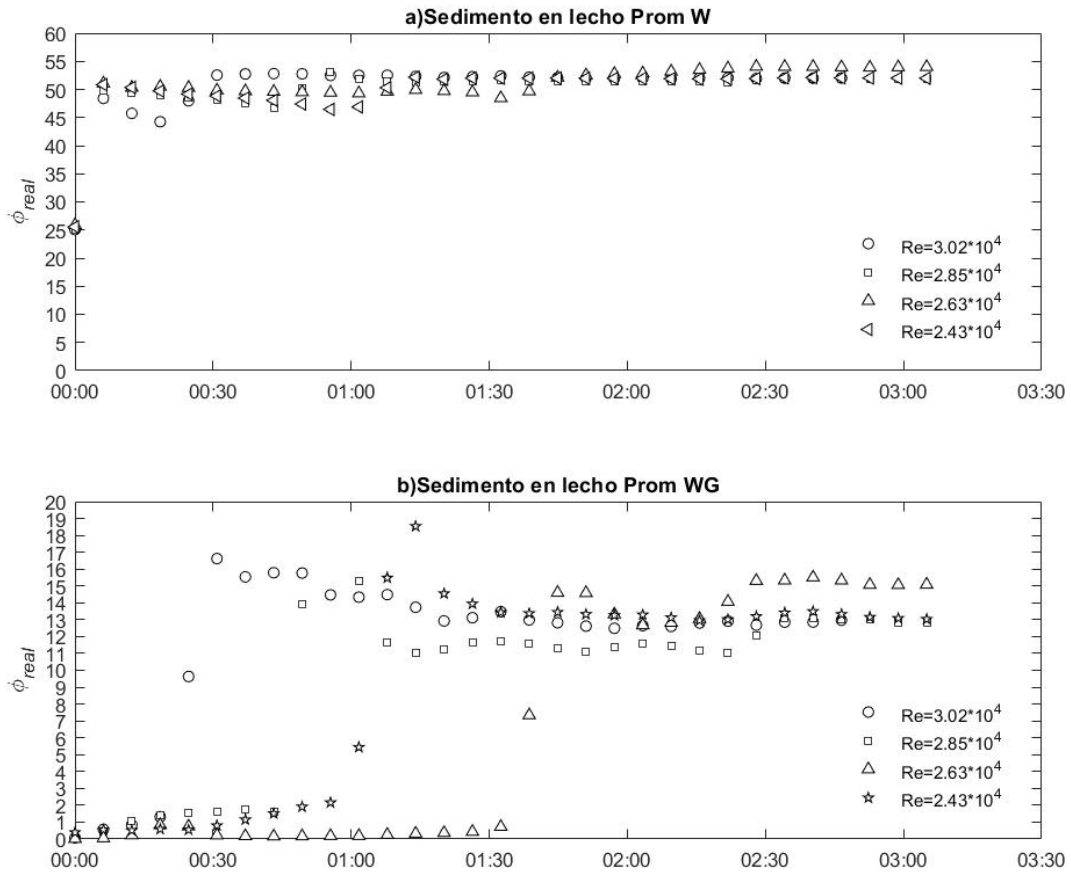


Figura 4-5: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 2.5 l.



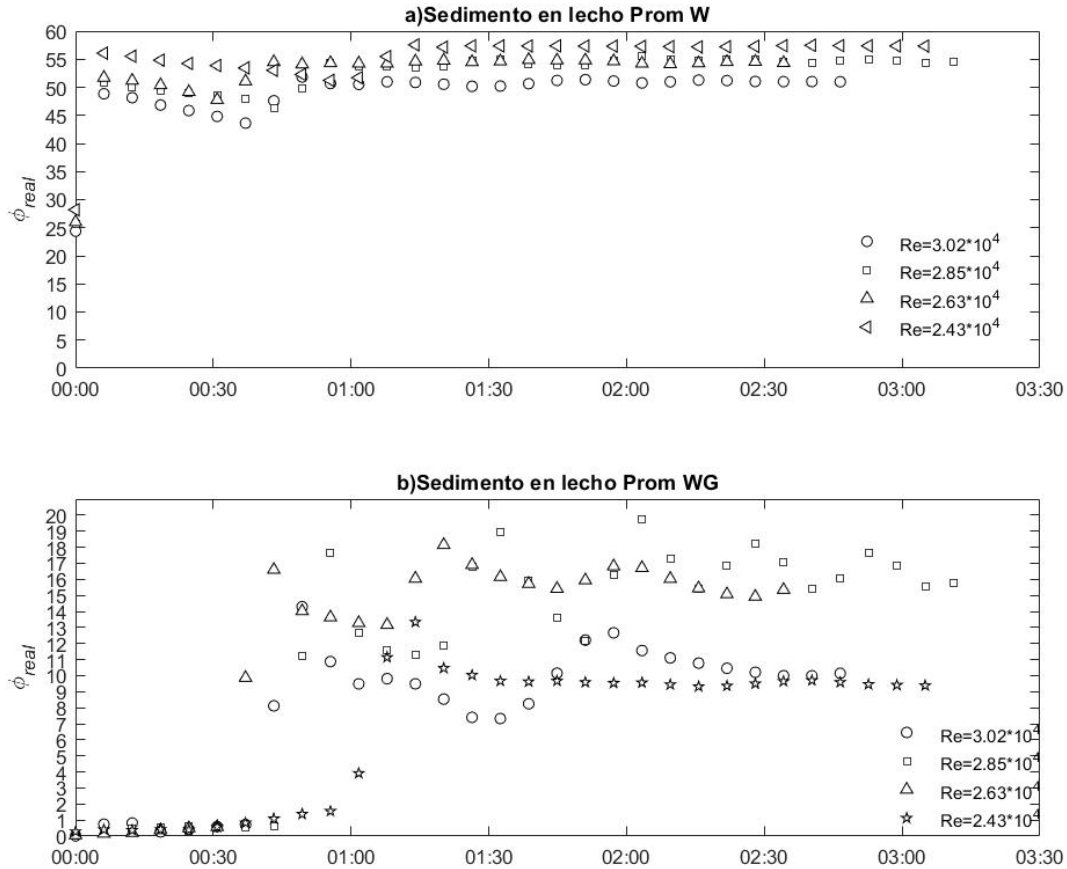


Figura 4-6: Concentración promedio del relave depositado en el tiempo en horas sobre la sección del lecho mediante referencia agua (W) y agua-grava (WG) para 3.0 l.

A fin de comprender la incorporación del sedimento en el lecho se presenta la Figura 4-17 donde se observa la concentración promedio del relave depositado en función del número de Reynolds. Para el caso donde el volumen vertido de relave es 3.0 l, se observa que la concentración alcanzada es prácticamente la misma para todos los valores de Reynolds, alcanzando valores en alrededor del 16%. Mientras que para el caso donde se incorporan 2.5 litros de relave al sistema, existen variaciones con respecto a su concentración, estas oscilan entre 8.3% y 11.3%. Sin embargo, para volúmenes de relave incorporados menores a 2.5 l las concentraciones presentan un comportamiento con alta variabilidad, llegando a medir una mayor concentración para el volumen de relave de 1.5 l que para el de 2.0 l. Este comportamiento podría estar asociado a que el tiempo de medición fue corto o que el tomógrafo no es capaz de identificar concentraciones bajas.

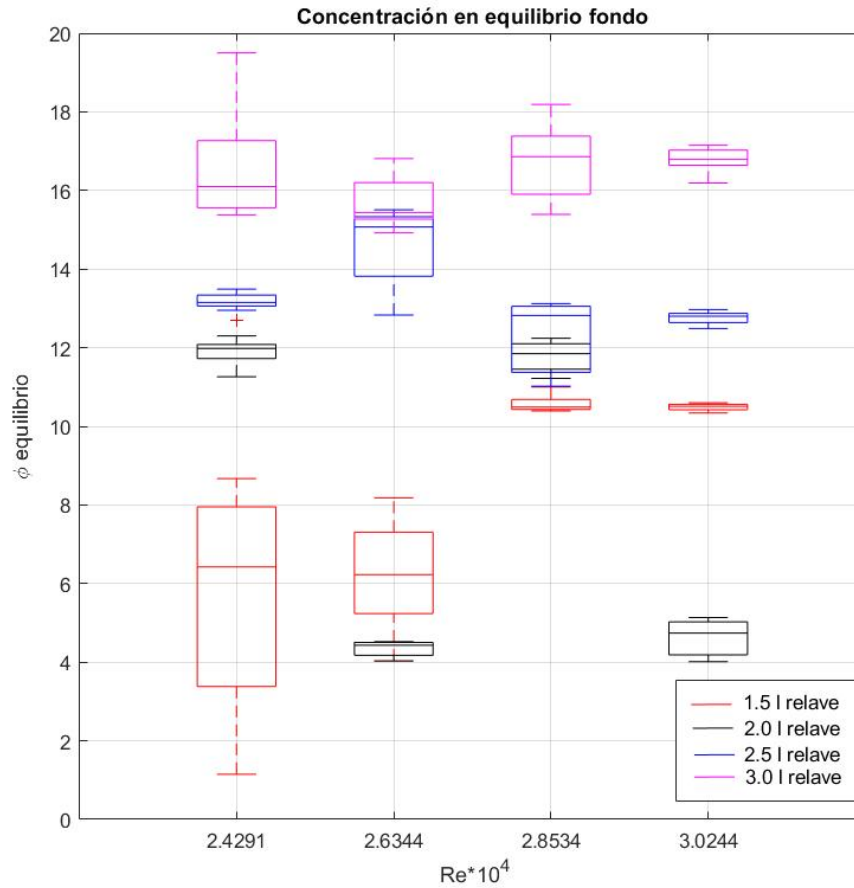


Figura 4-14-4: Concentración adimensional de relave depositado en función de Reynolds

#### 4.5. Series de tiempo suspensión

Las Figura 4-7 - Figura 4-10 muestran las series de tiempo de las concentraciones de relave en suspensión para todos los experimentos. En los cuales se aprecia que para volúmenes altos de relave ingresado al sistema la estabilización de las concentraciones se alcanza rápidamente, tendiendo a valores muy cercanos a cero, considerando el nivel de referencia WG. En el caso de volumen de 1.5 l se observan que las concentraciones para los Reynolds de  $3.02 \times 10^4$  y  $2.63 \times 10^4$ , son bastante altas con respecto a los otros experimentos del mismo volumen, lo cual nos puede dar un indicio que para volúmenes de relaves muy bajos ingresados al sistema, el tomógrafo no sería capaz de representar de buena forma las concentraciones en suspensión.

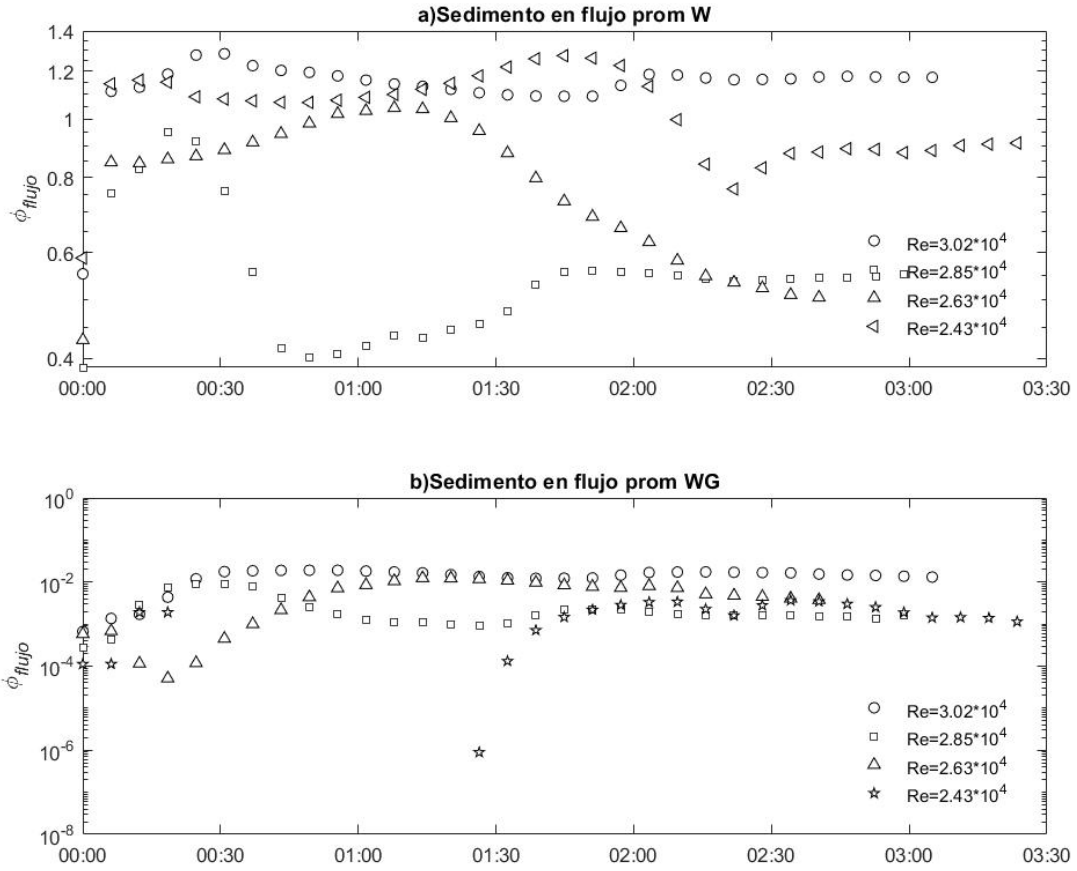


Figura 4-7: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 1.5 l.

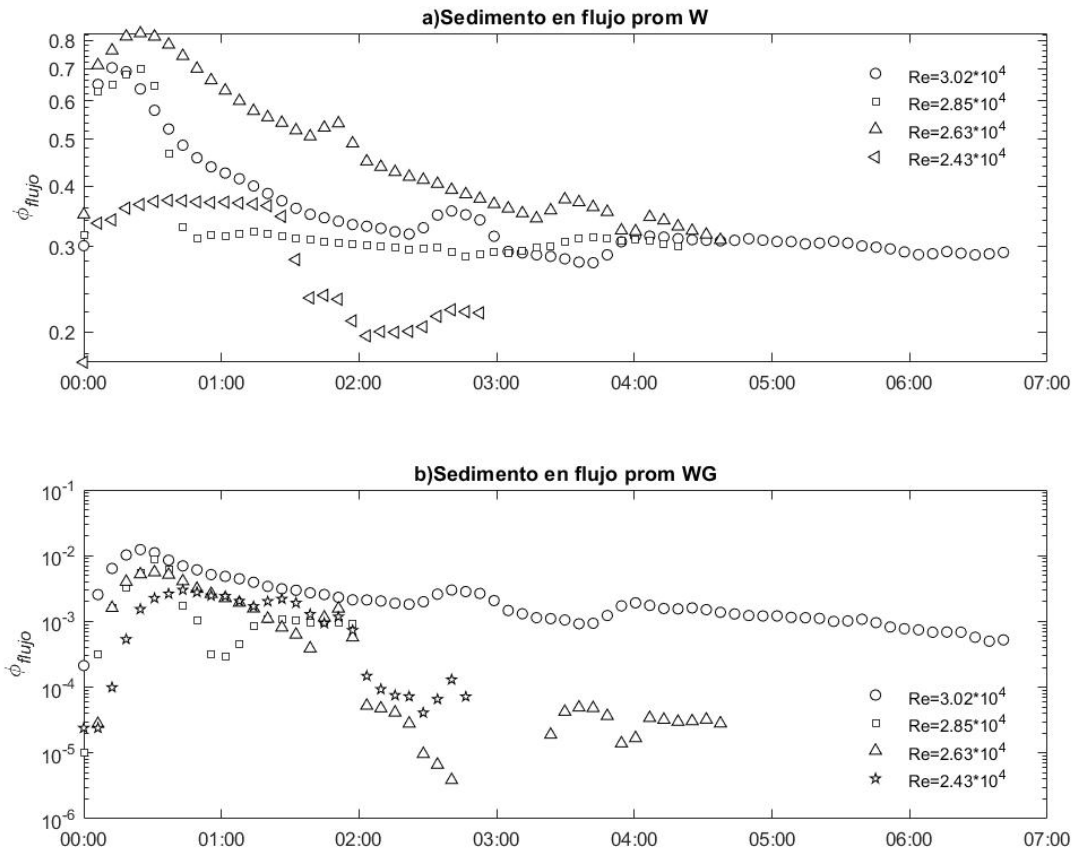


Figura 4-8: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 2 l.

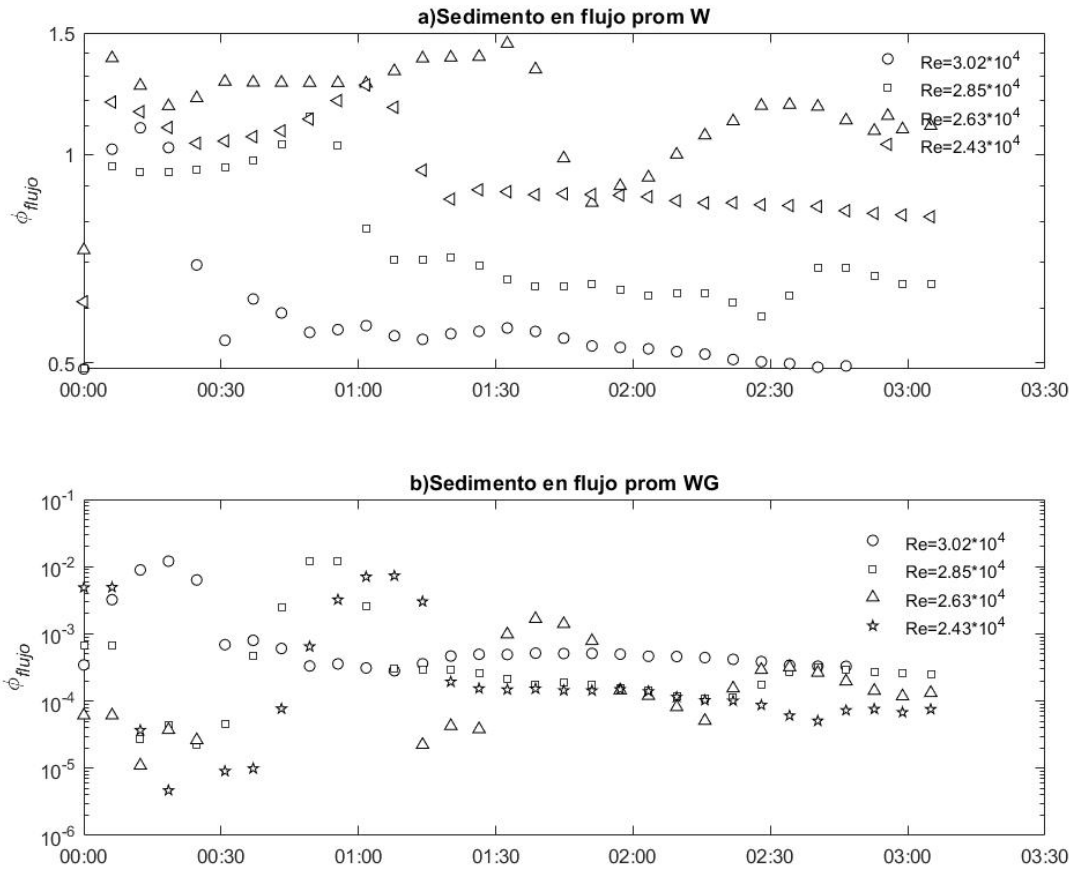


Figura 4-9: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 2.5 l.

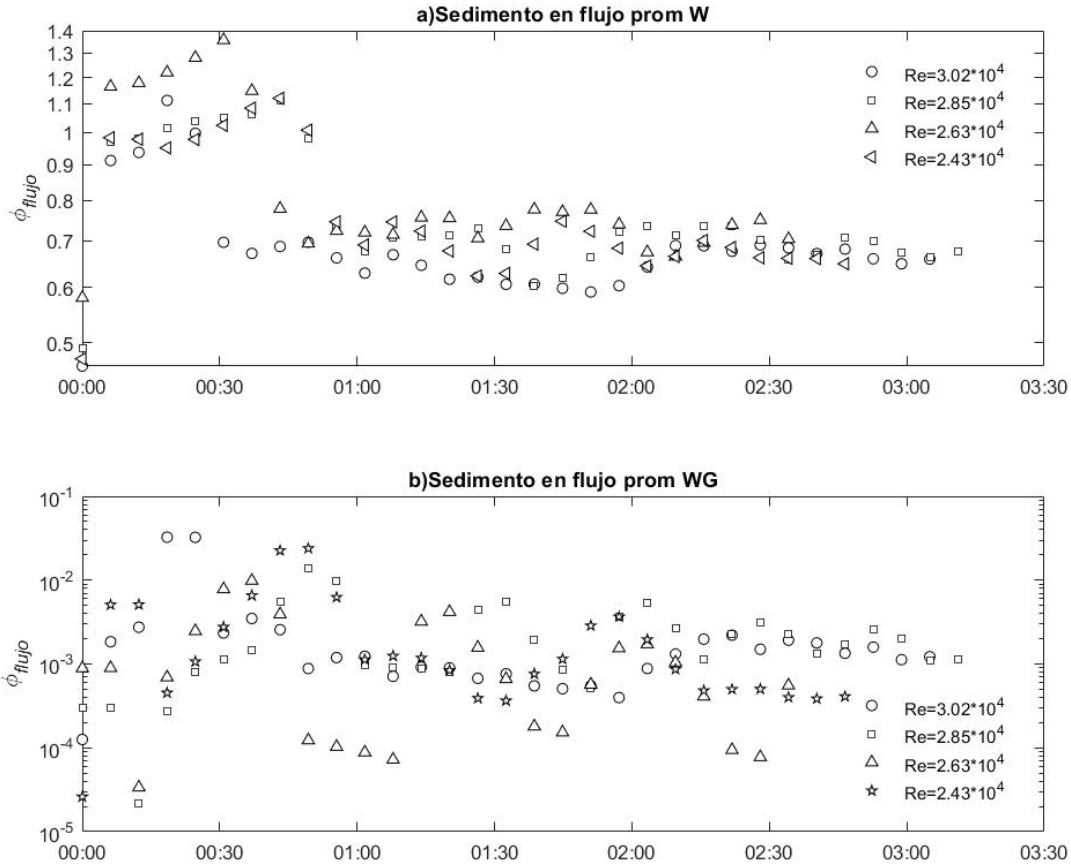


Figura 4-10: Concentración promedio del relave suspendido en el tiempo sobre la sección del tomógrafo mediante referencia agua-grava (WG) para 3 l.

Por otra parte, las concentraciones promedio en suspensión de acuerdo a la Figura 4-11 muestran una alta variación para diferentes volúmenes de sedimento, y que no guardan relación con la cantidad de sedimento ingresado al sistema, lo que puede estar asociado principalmente a que el tomógrafo no es capaz de representar de buena forma el sedimento en suspensión, debido al tamaño de las grillas espaciales.

A mayor valor de número de Reynolds, mayor es la velocidad de corte, y además para  $D_{50}$  de la partícula de relave la razón  $\frac{u_*}{w_s}$  es mayor a la unidad, por lo cual el transporte de relave en suspensión también es mayor.

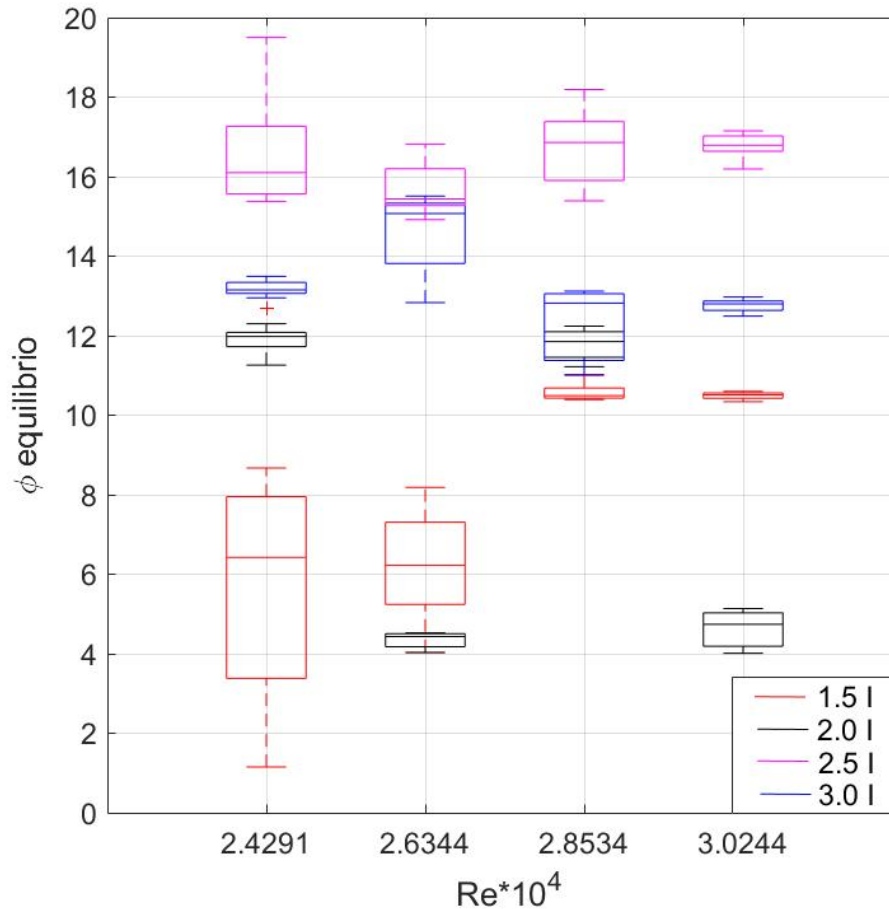


Figura 4-11: Concentración adimensional de relave en suspensión en función de Reynolds

#### 4.6. Tomogramas

Las Figura 4-12- Figura 4-19 son los tomogramas en base a la referencia WG y W para un volumen de 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 litros de relave, donde la diferencia entre ambas se puede apreciar tanto cualitativamente como cuantitativamente, esto debido al tipo de referencia. Si observamos la referencia WG se puede apreciar claramente como ocurre la depositación a través del tiempo, en cambio para la referencia W es difícil de visualizar, debido a que considera dentro de las concentraciones la presencia de la grava. Por lo mismo se prefiere la referencia WG ya que es la que mejor caracteriza la depositación del sedimento.

Al visualizar los tomogramas se observa que, para un mismo volumen de sedimento, se colmata con mayor rapidez la porosidad de la grava con sedimento fino cuando el caudal es mayor. También se observa que a menor volumen de sedimento ingresado al sistema se genera una menor concentración de sedimento en suspensión y la depositación se produce en forma más lenta.

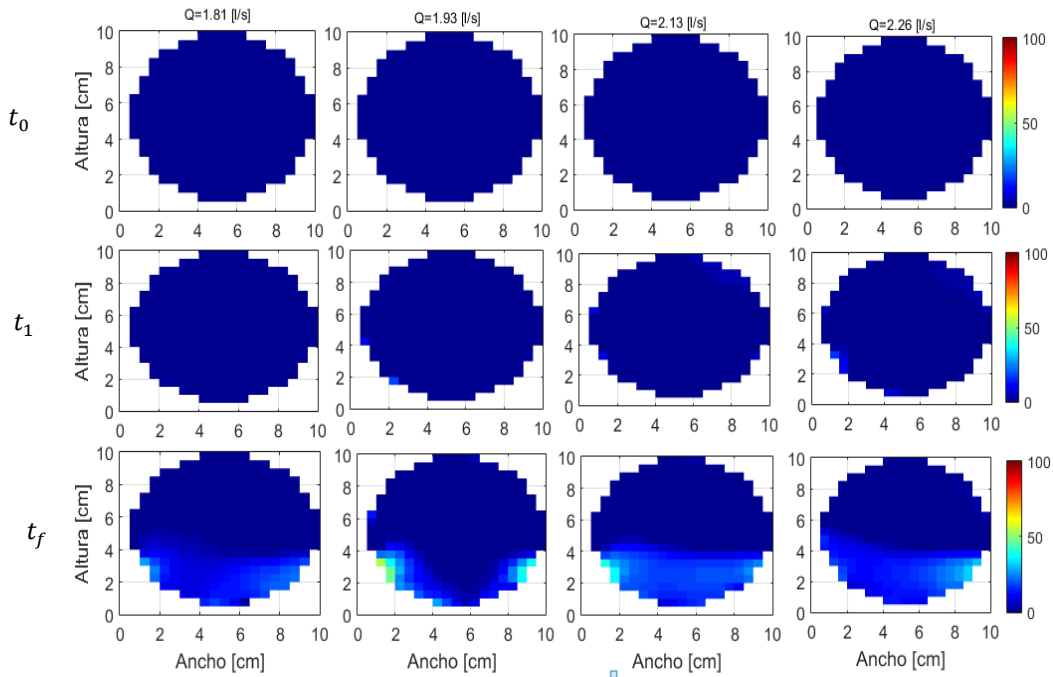


Figura 4-12: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 1.5 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

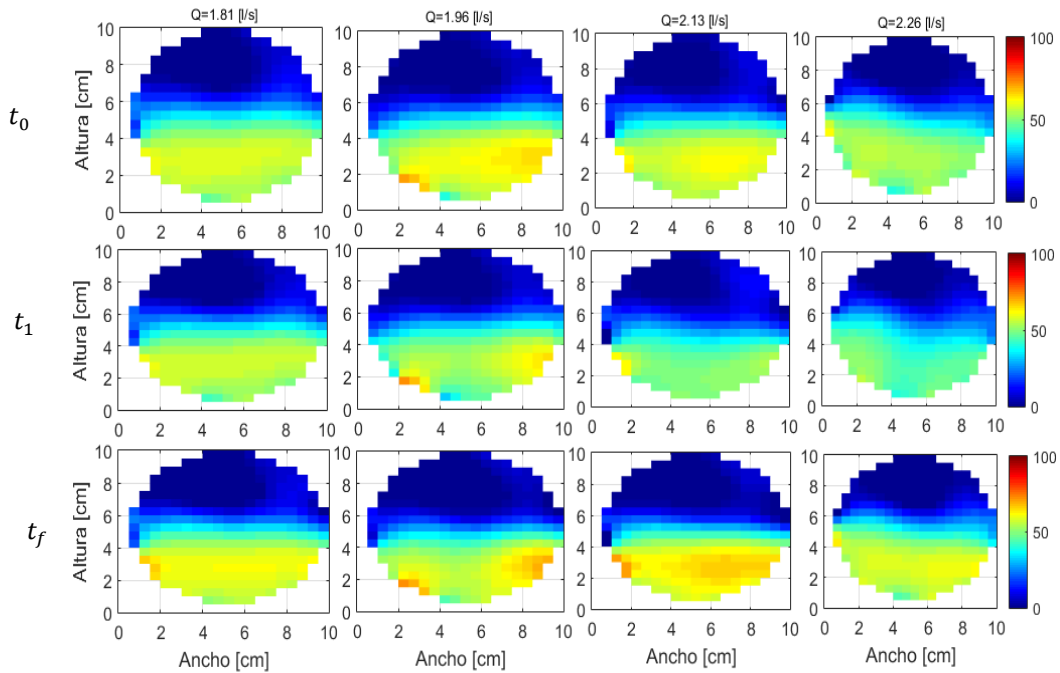


Figura 4-13: Tomogramas en base a referencia W para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 1.5 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.



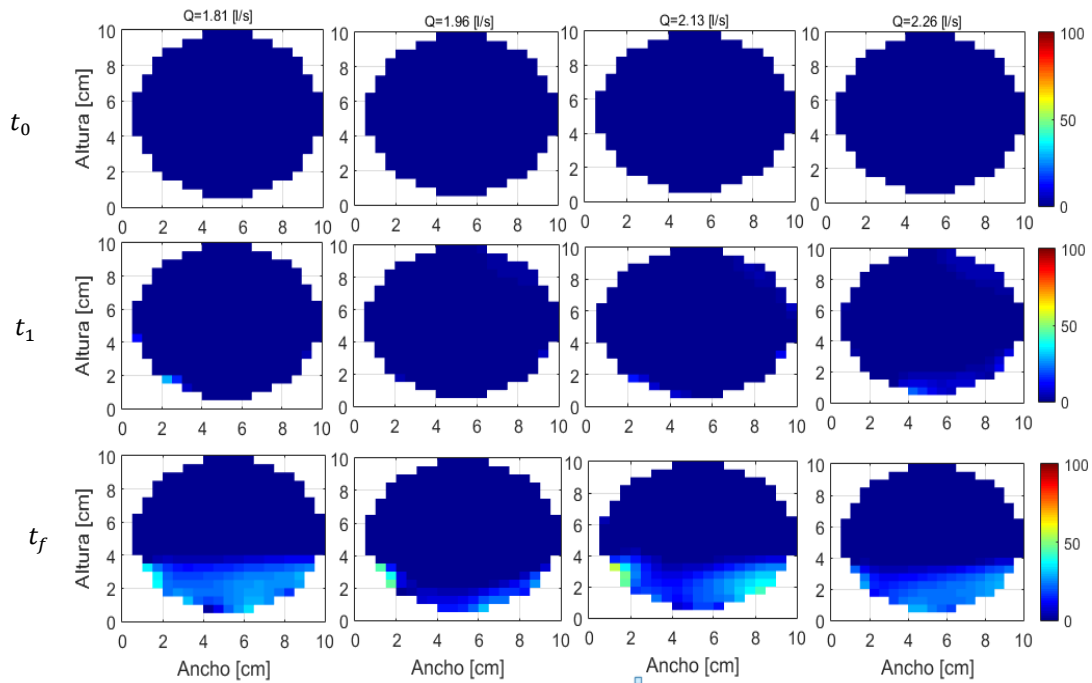


Figura 4-14: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

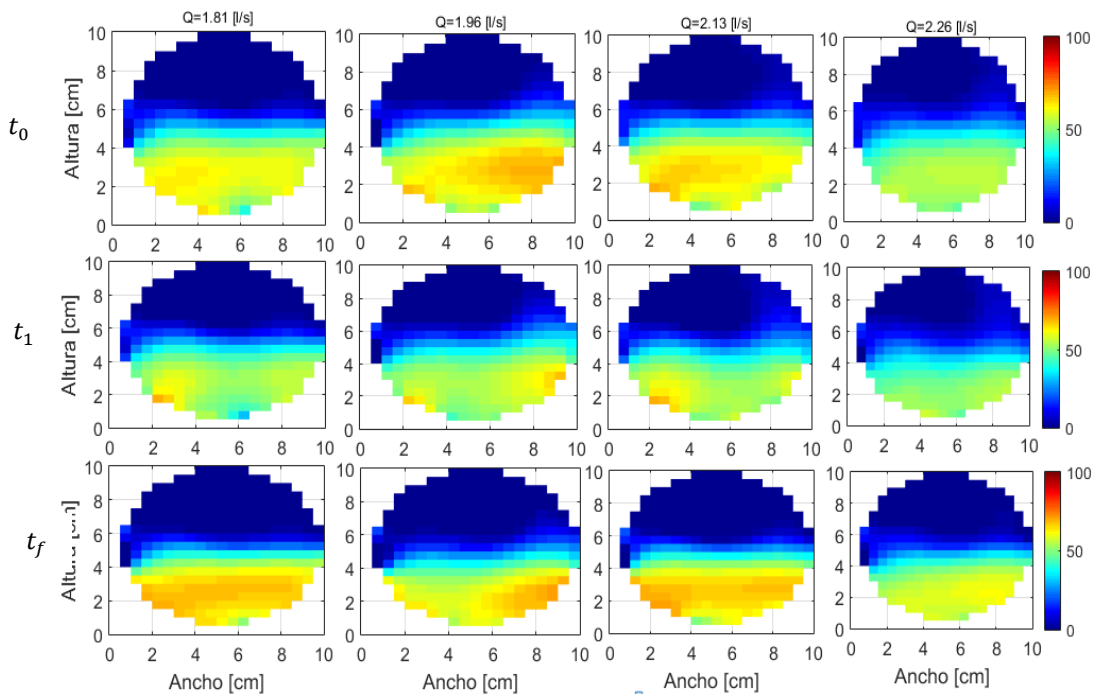


Figura 4-15: Tomogramas en base a referencia W para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

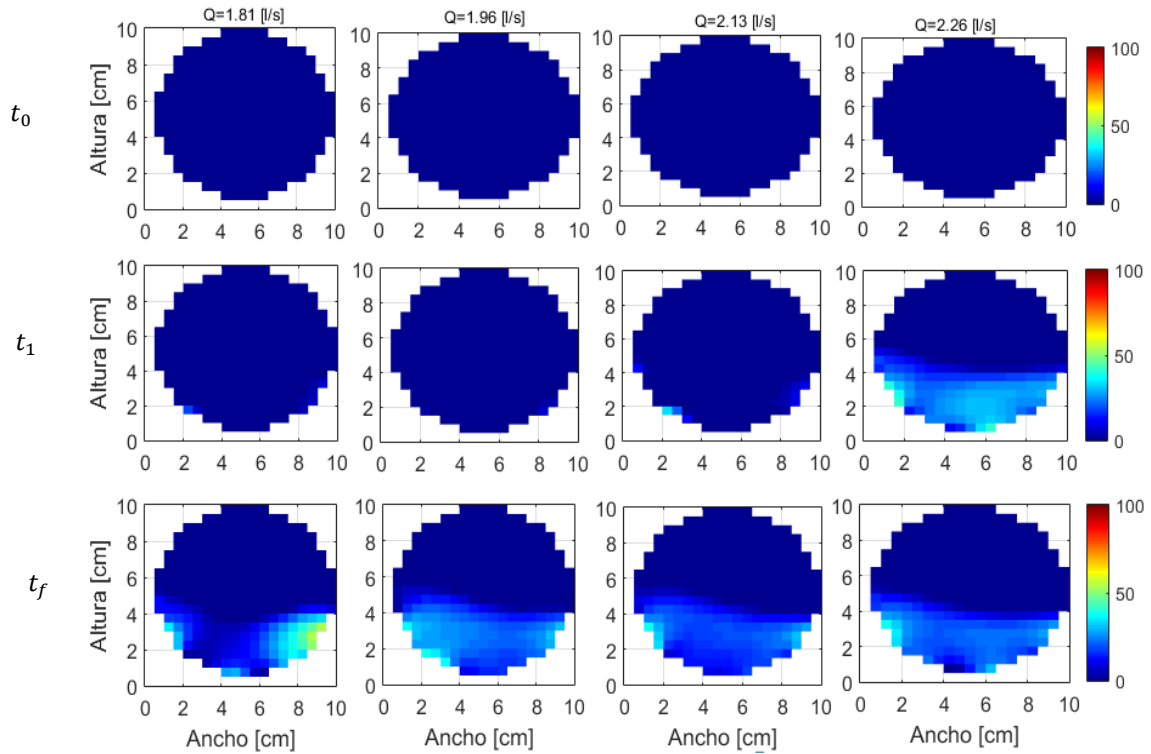


Figura 4-16: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

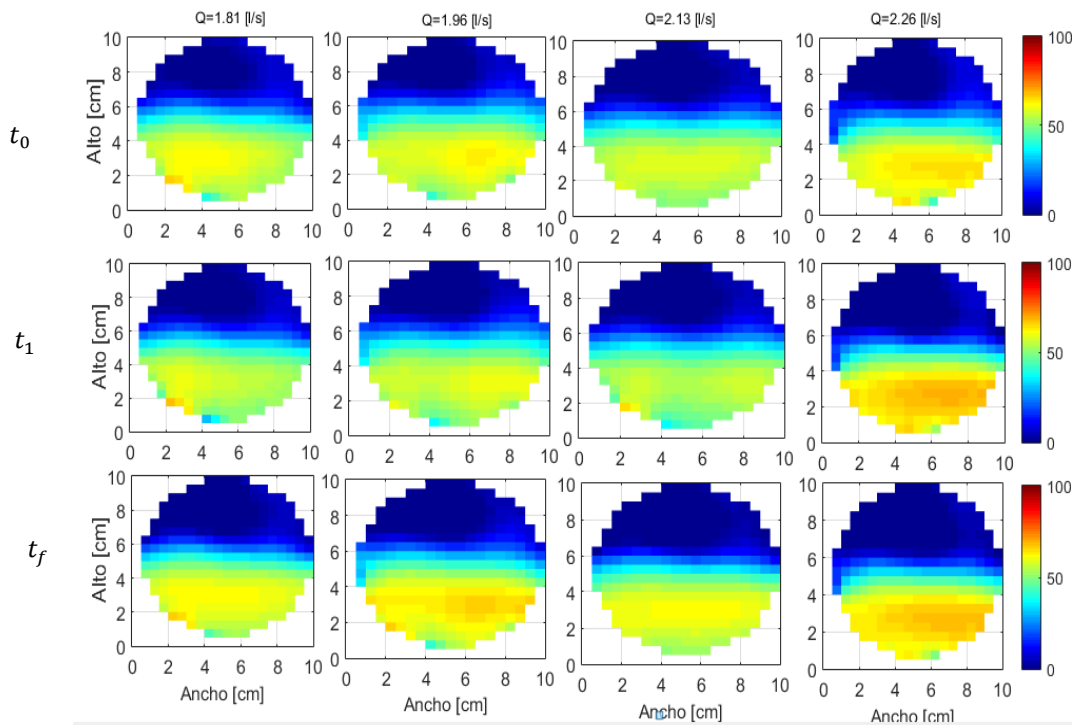


Figura 4-17: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 2.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

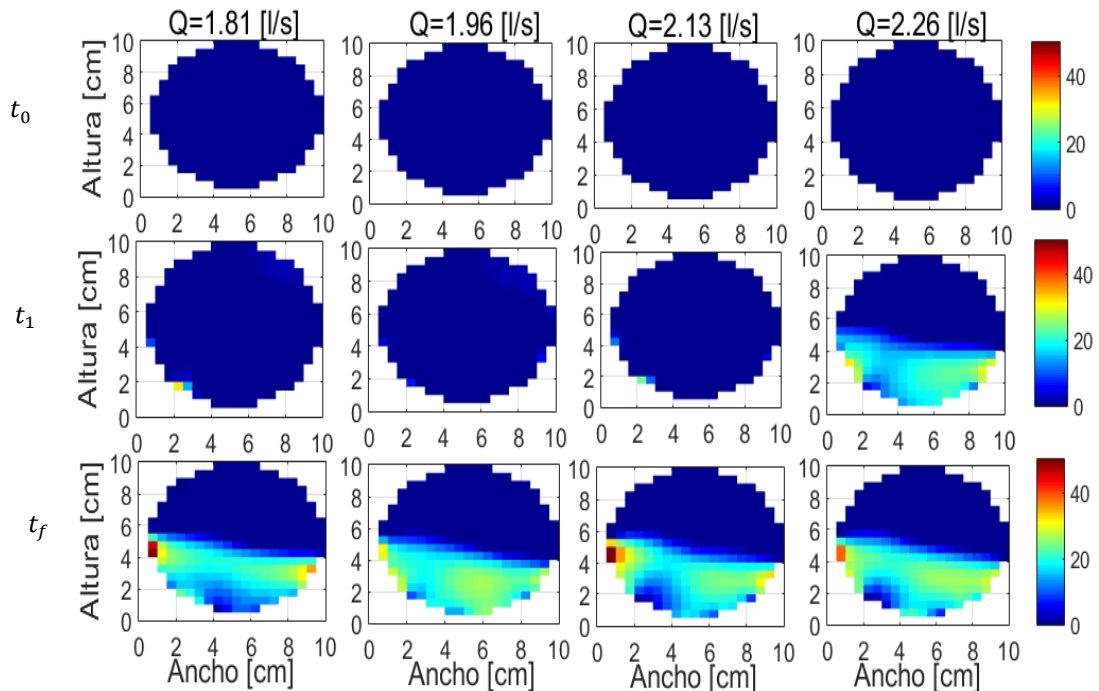


Figura 4-18: Tomogramas en base a referencia WG para relave minero, a distintos caudales para un volumen de 3.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

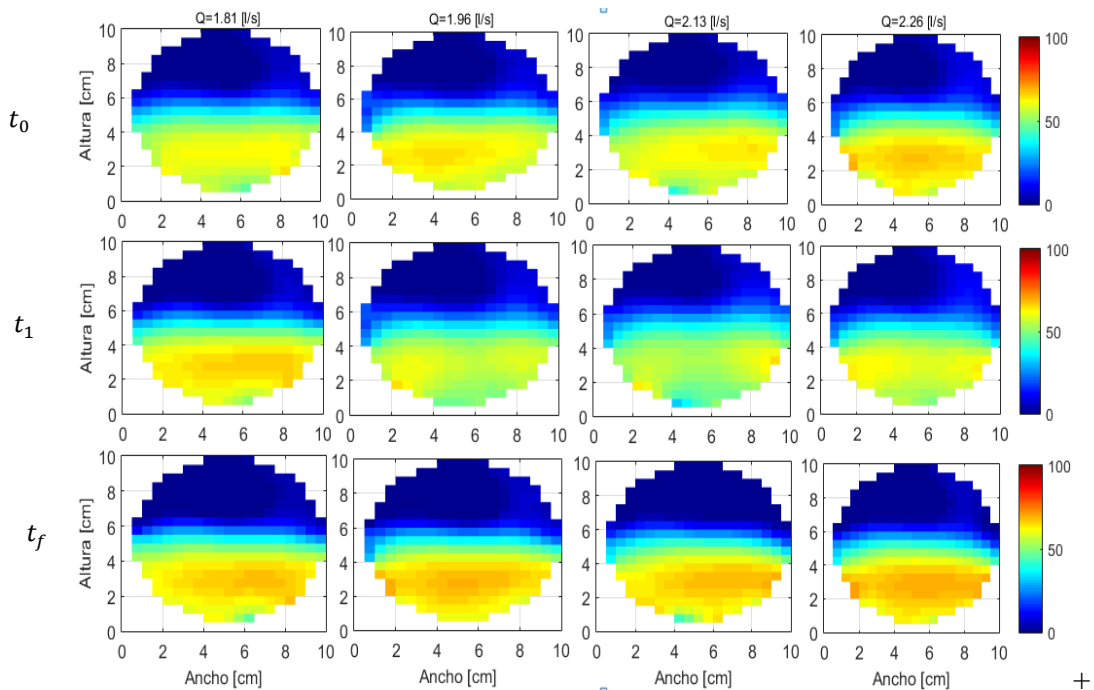


Figura 4-19: Tomogramas en base a referencia W para relave minero a distintos caudales para un volumen de 3.0 litros de sedimento. Las variables  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_f$  corresponden a tiempo inicial, 20 min y 3 hrs. respectivamente.

# Capítulo 5 Análisis de resultados

### 5.1. Gasto Sólido de fondo

El gasto sólido de fondo  $q_s$  queda definido como (Fuentes, 2017):

$$q_s = \frac{Q_i C}{D(z)} \quad (20)$$

donde:

$Q_i$ : Es el caudal interior que circula a través del lecho móvil en la mitad inferior de la tubería y es determinado mediante la diferencia entre el Caudal medido por el tubo Venturi y el obtenido mediante el PIV.

$C$ : Es la concentración promedio de la última línea del tomograma obtenido en los últimos 5 minutos del experimento medidos desde el fondo de la tubería.

$D(z)$ : Es el ancho de la tubería del nivel de sedimento depositado en el lecho medido desde el fondo.

Tabla 5-1:Gasto sólido de fondo

$Qt$ (l/s)	$V_{tot}$ (l)	$Q_i$ (l/s)	$D(z)$ (m)	$C$ (%)	$q_s$
1.81	1.5	0.0905	0.103	0.0210	1.854E-05
	2.0		0.103	0.0464	4.092E-05
	2.5		0.108	0.0278	2.322E-05
	3.0		0.114	0.0378	3.000E-05
1.96	1.5	0.0980	0.103	0.0270	2.579E-05
	2.0		0.103	0.0280	2.678E-05
	2.5		0.108	0.0338	3.058E-05
	3.0		0.114	0.0332	2.853E-05
2.13	1.5	0.1065	0.103	0.0236	2.455E-05
	2.0		0.103	0.0328	3.402E-05
	2.5		0.108	0.0321	3.154E-05
	3.0		0.114	0.0322	3.012E-05
2.26	1.5	0.113	0.103	0.0204	2.248E-05
	2.0		0.103	0.0396	4.357E-05
	2.5		0.108	0.0415	4.332E-05
	3.0		0.114	0.0368	3.644E-05

A fin de caracterizar el gasto sólido de fondo obtenido experimentalmente, se procede a graficar el esfuerzo de corte adimensional,  $\tau_*$ , versus el gasto sólido de fondo adimensionalizado,  $q_s^*$ , en función del parámetro  $e/D_g$ . Tenemos que el gasto sólido adimensional se representa como.

$$q^* = \frac{q_s}{\sqrt{gRd_s^3}} \quad (21)$$

El parámetro  $e/D_g$ , representa la exposición del sedimento con respecto a la grava, donde el valor  $e = H_{relave} - H_{grava}$ , donde estas son las alturas desde el fondo del relave depositado y la grava respectivamente. siendo  $D_g$  igual al  $D_{50\ grava}$ . En la Figura 5-1 podemos observar los parámetros mencionados.

Dado que los caudales utilizados en los experimentos con tomógrafo no fueron los mismos que los que se utilizaron mediante PIV (Fuentes 2017), el valor de  $\tau^*$  corresponde al esfuerzo de corte extrapolado,  $\tau_{ext}$ , en función del caudal utilizado en el tomógrafo, definiéndose de esta forma como:

$$\tau^* = \frac{\tau_{ext}}{\rho g R D_{50\ relave}} \quad (22)$$

donde  $D_{50\ relave} = 0.199\ mm$ , correspondiente al diámetro del relave, y  $R=0.4913$ , asociado a la densidad media del relave de  $1.4913\ kg/m^3$ .

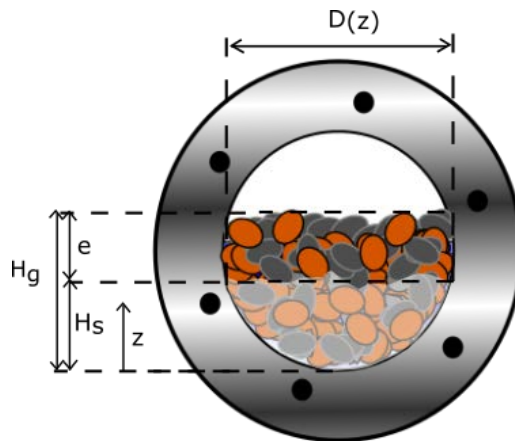


Figura 5-1: Descripción parámetro  $e/D_g$  y  $D(z)$ . Fuentes (2017)

La Tabla 5-2 presenta el caudal, volumen relave vertido,  $e/D_g$ , gasto sólido ( $q_s^*$ ) y esfuerzo de corte adimensional ( $\tau_*$ ), para los 16 experimentos realizados en esta investigación.

Tabla 5-2: Resumen experimentos gasto sólido de fondo

$Qt$ (l/s)	$V_{tot}$ (l)	$e/D_g$	$q_s^*$	$\tau_*$
1.81	1.5	-0,400	2.994	0.935
	2	-0,400	6.609	0.935
	2.5	-0,300	3.751	0.935
	3	-0,100	4.846	0.935
1.96	1.5	-1,000	4.167	1.087
	2	-0,500	4.326	1.087
	2.5	-0,400	4.940	1.087
	3	-0,200	4.608	1.087
2.13	1.5	-0,800	3.965	1.290
	2	-0,500	5.495	1.290
	2.5	-0,300	5.094	1.290
	3	-0,100	4.865	1.290
2.26	1.5	-0,700	3.631	1.471
	2	-0,500	7.038	1.471
	2.5	-0,400	6.997	1.471
	3	-0,200	5.886	1.471

La Figura 5-2 muestra la relación  $q_s^*$  vs  $\tau_*$ , tanto para los datos medidos experimentalmente en esta investigación como los experimentos realizados por Kuhnle et al. (2013), Fuentes (2017) y Niño et al (2018). Es necesario indicar que Fuentes (2017) utilizó la misma instalación experimental, utilizando partículas de vidrio de  $D_{50}=0.120$  mm, y en el caso de Niño et al. (2018) utilizó arena con un  $D_{50}=0.45$  mm en un canal rectangular de 0.3 m de alto y ancho, y 12 m de longitud. Y con la expresión de gasto sólido de Meyer-Peter y Müller (1948), la cual es ampliamente utilizada para gasto sólido de fondo de material grueso. Corroborando que las predicciones de gasto sólido de fondo de Meyer-Peter y Müller sobrestiman los resultados obtenidos experimentalmente.

Se observan que los datos experimentales con relave se acoplan en forma satisfactoria si se compara el gasto sólido adimensional versus el esfuerzo de corte adimensional. Además, la relación  $e/D_g$  se acopla bastante bien a los resultados obtenidos por Fuentes (2017) y Kuhnle et al. (2013), que son los que se encuentran en zonas similares de esfuerzo de corte y gasto sólido adimensional que los realizados en este estudio. También cabe mencionar que la exposición del relave de cobre con respecto al lecho se midió in situ una vez terminado los experimentos en la zona del tomógrafo, donde los valores de  $e/D_g$  fluctúan entre -1 y -0.1, siendo el valor de -0.1 cuando el nivel del relave de cobre es más alto.

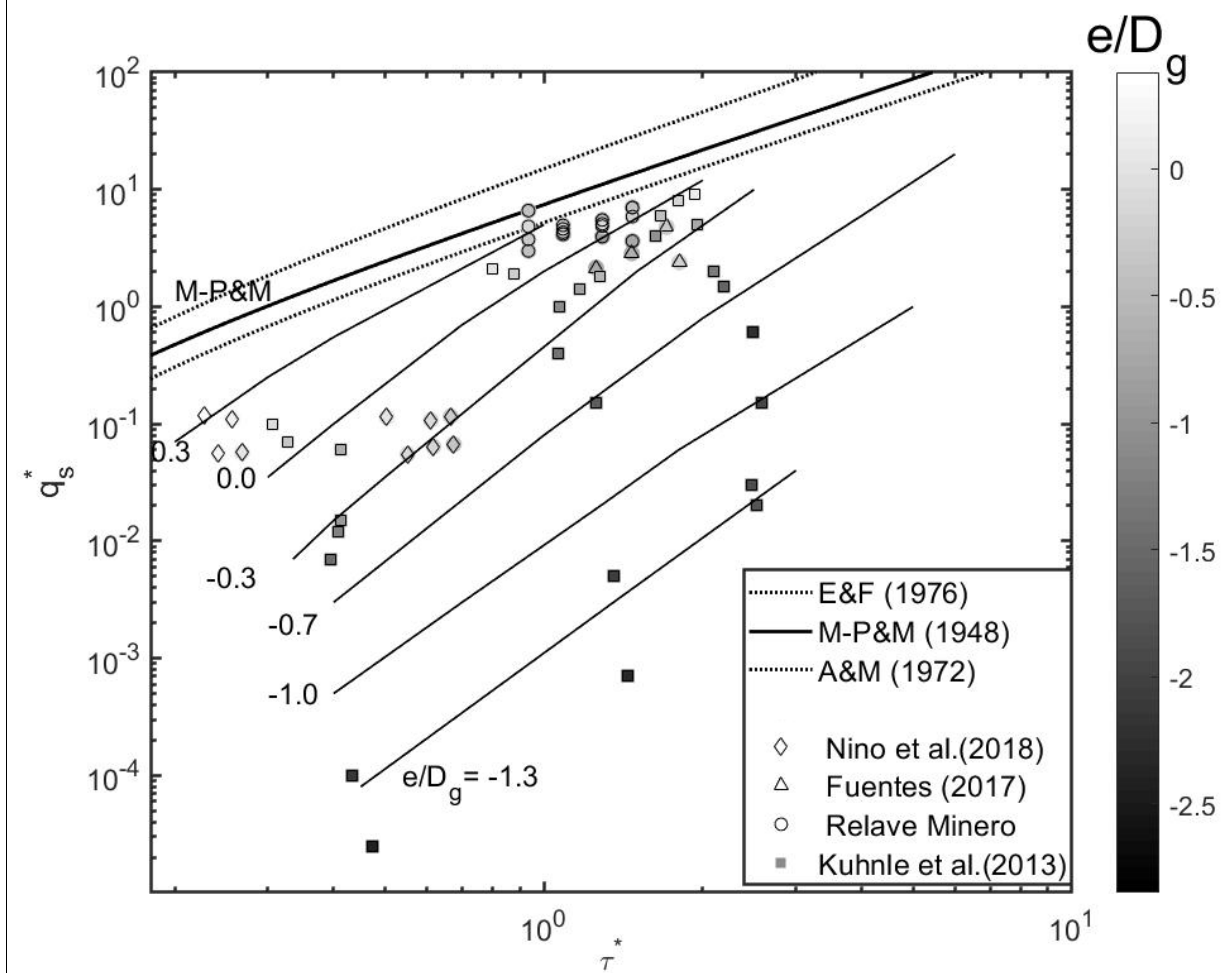


Figura 5-2: Gasto sólido adimensional en función  $e/D_g$  y  $D(z)$ . Se presentan datos experimentales del presente estudio mediante Relave minero, de Niño et al. (2018), Fuentes (2017) mediante partículas de vidrio, Khunle et al (2013) expresión predictiva de gasto sólido de Meyer- Peter y Müller (1948).

Los resultados obtenidos por el tomógrafo para obtener el gasto sólido de fondo en todas las experiencias se comportan de manera similar. Así como el valor de  $e/D_g$  que representa el grado de exposición de las partículas de relave con respecto al lecho de grava, donde a mayores valores de  $e/D_g$  se observa que existen mayores concentraciones de sedimento en el lecho.

Los valores de  $e/D_g$  obtenidos en los experimentos se encuentran en los rangos de -1 y -0.2, lo que implica que el lecho se encuentra bastante expuesto a las partículas de relave, alcanzando a cubrir casi la totalidad del lecho para los experimentos con volúmenes de 3.0 l.

Se debe considerar que a mayores valores de  $e/D_g$  el esfuerzo de corte va disminuyendo, debido a la disminución de la rugosidad del lecho, sin embargo, para estos experimentos se consideró que el esfuerzo de corte no se ve modificado, debido a que fue obtenido experimentalmente solo con la grava. Por lo cual hace necesario nuevos experimentos donde se determinen los esfuerzos de corte



a medida que el lecho se va llenando de sedimento. Según Niño et al. (2018) una modificación del esfuerzo de corte producto de la exposición del sedimento al lecho podría disminuir entre 32-44 %.

## 5.2. Sedimento en suspensión

Mediante el proceso iterativo descrito en la sección 2.1.3 se obtiene la velocidad de sedimentación de las partículas para cada diámetro característico. La Tabla 5-3 presenta los resultados de las velocidades de sedimentación para cada diámetro característico, las velocidades se encuentran entre el rango de 0.005 y 3.44 cm/s.

Dada las altas velocidades de sedimentación obtenidas, se puede indicar que está asociada a un Reynolds de la partícula relativamente elevados, lo que indica que a medida que aumenta el diámetro de la partícula, estas van a sedimentar en forma rápida.

Tabla 5-3: Velocidad de sedimentación

	$D$ (cm)	$Re_p$	$Cd$	$w_s$ (cm/s)
D10	0.00121	0.0007	35359.13	0.005
D16	0.00198	0.0030	8145.63	0.013
D50	0.01915	2.15	14.00	0.938
D84	0.03524	10.22	3.88	2.415
D90	0.04605	19.04	2.49	3.445

En el caso de la Tabla 5-4, se observa la relación  $u_*/w_s$ , para cada uno de los caudales y diámetro característico  $D_{50}$  obtenido de los experimentos, se observa que los valores  $u_*/w_s$  son todos mayores a 1, es decir que la velocidad de corte es mayor que la velocidad de sedimentación, por lo tanto las partículas de diámetro medio se encuentran en suspensión.

Tabla 5-4: Umbral de incorporación

$Qt$ (l/s)	$D_{50}$ (cm)	$Rp$	$u_*$	$u_*/w_s$
1.81	0.00121	2.23	2.937	3.133
1.96	0.00198		3.168	3.378
2.13	0.01915		3.451	3.681
2.84	0.03524		3.684	3.929

Considerando los valores de velocidad de sedimentación, velocidad de corte y Reynolds de la partícula de cada grupo de experimentos es posible graficar  $u_*/w_s$  vs  $Rp$ . De esta forma se puede graficar los valores experimentales y compararlos con los criterios de incorporación de Bagnold (1966), Van Rijn (1984) y el ajustado por Niño et al. (2003).

La Figura 5-3 representa el umbral de incorporación de las partículas en suspensión, los criterios experimentales desarrollados por Bagnold (1966), Van Rijn (1984) y Niño et al (2003) se

representan a través de una línea segmentada roja, línea segmentada azul y línea continua respectivamente, lo cual indica que sobre esta línea las partículas deberán comenzar a suspenderse. Los puntos representan datos experimentales obtenidos en este trabajo para diferentes caudales asociados a diferentes diámetros de la partícula,  $D_{10}, D_{16}, D_{50}, D_{84}, D_{90}$  respectivamente de izquierda a derecha.

Considerando que en los experimentos realizados se observan partículas en suspensión, se puede indicar que con el rango de Bagnold se representa bien el umbral de incorporación para  $Rp > 1$ , dado que los valores experimentales se encuentran sobre el umbral donde se origina el transporte en suspensión. Por otro lado, la caracterización realizada por Van Rijn (1984) y Niño et al. (2003), para diámetros característicos mayor a  $D_{50}$ , se ajusta bien para el umbral de incorporación, sin embargo para el  $D_{50}$ , el ajuste propuesto por Niño et al. (2003), sobrestima los valores del umbral de incorporación para este tamaño de partícula.

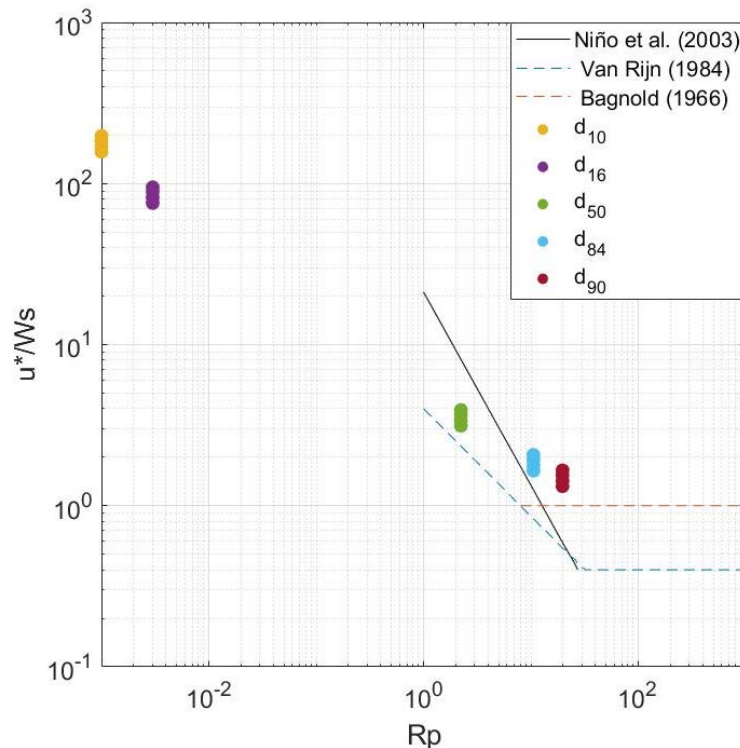


Figura 5-3: Comparación entre los resultados experimentales y los criterios de umbrales de incorporación propuesto por Niño et al. (2003) y Van Rijn (1984).

Se comparan los valores experimentales junto al modelo de Rouse (1937) para sedimento en suspensión. La Figura 5-4 muestra la concentración de sedimento en suspensión hecho adimensional por la concentración de referencia de cada experimento en función de  $z/h$ , mientras que para el modelo de Rouse se grafica de acuerdo a la ecuación  $\frac{\bar{c}}{c_{ref}} = \left\{ \frac{1-\xi}{\xi} - \frac{\xi_{ref}}{1-\xi_{ref}} \right\}^Z$ , para valores de  $w_s/u_*$  entre 0.3 y 1.0. Valores de  $w_s/u_*$  cercanos a 1 tienen poca concentración de sedimentos en toda la columna de agua, mientras que valores bajo 0.01 el perfil de concentración

de sedimento en suspensión es casi constante en la columna de agua. Para valores de  $z/h = 1$  la concentración es nula. Para graficar las curvas de Rouse se utilizó  $\xi_{ref} = 0.05$  y  $Z = w_s/ku_*$ , donde  $k$  es la constante de Von Karman cuyo valor es 0.4.

La concentración de referencia se determina mediante la concentración medida en el tomógrafo a una altura  $Z_{ref} = 0.05 h$  que equivale a los pixeles que se ubican en la primera capa sobre el lecho.

Se observa que la mayor cantidad de valores de concentración en suspensión se encuentran bajo la curva de Rouse  $w_s/u_* = 0.5$ . Donde la curva representa la concentración teórica adimensionalizada, la cual a mayores valores de  $w_s/u_*$ , las concentraciones en suspensión disminuyen, concentrándose principalmente la suspensión de partículas en  $z/h$  en la cercanía del lecho.

En la Figura 5-4 se presenta resultados experimentales incorporados en el modelo de Rouse, donde se aprecia que para los volúmenes de relave vertidos mayores a 2.0 l valores cercanos a la altura de referencia ( $h_{ref}$ ), la  $\frac{\bar{c}}{c_{ref}}$  es cercana a los valores de la curva de Rouse asociada a  $w_s/u_* = 0.5$ , es decir, se observa que a mayores valores de  $z/h$  los valores de  $\bar{c}/c_{ref}$  disminuyen hasta llegar a valor cero, sin embargo para algunos experimentos se observan valores en la zona  $z/h$ , esto es posible debido a la influencia de las burbujas aire en la zona superior de la tubería. Ahora bien, si se desprecian los valores en las zonas cercanas a la altura de la tubería, se puede indicar que para los experimentos seleccionados asociados a volúmenes de vertimientos más altos, los valores experimentales se encuentran dentro del rango de las curvas de Rouse. Donde los valores mayores de suspensión se encuentran a una altura  $z/h = 0.2$ , que corresponde al 20% de la columna de agua.

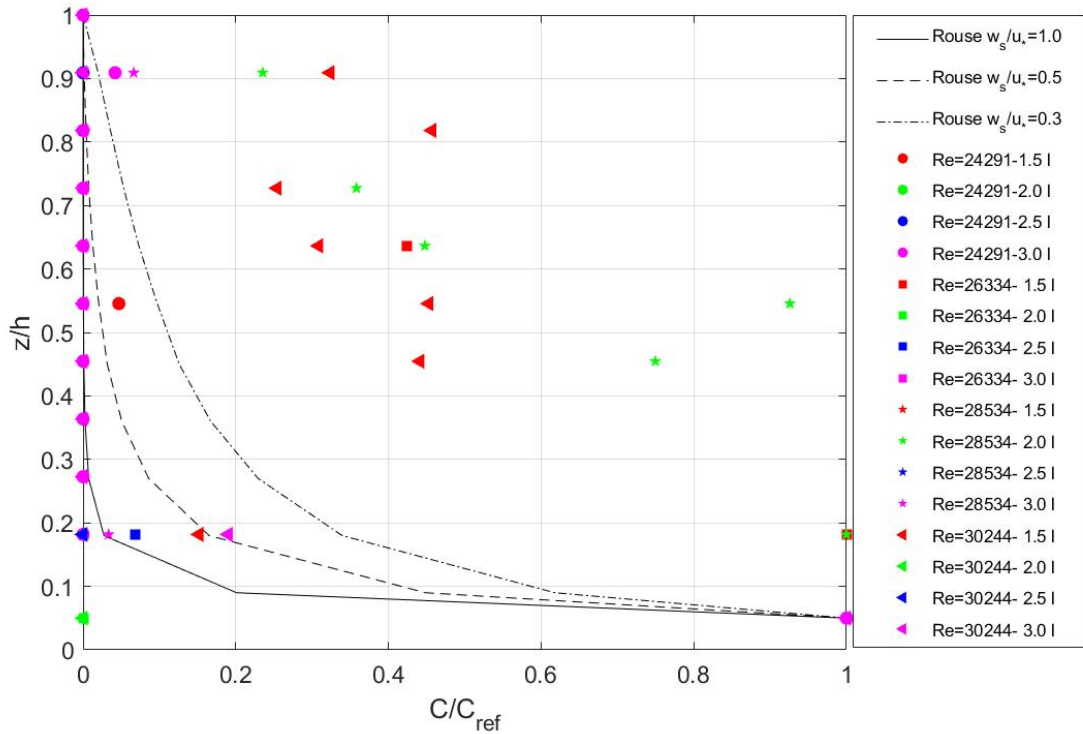


Figura 5-4: Concentración de sedimento en suspensión partido por la concentración de referencia como función de  $z/h$ , valores filtrados.

Mediante el uso del tomógrafo se obtiene la concentración estabilizada de sedimento en suspensión. Además, conociendo la velocidad promedio del flujo asociado al espacio libre, es posible calcular el gasto sólido en suspensión de acuerdo a lo indicado en el Capítulo 2.1.2. La Tabla 5-5 muestra los valores de gasto sólido obtenido a través de los datos experimentales.

Tabla 5-5: Cálculo de Gasto sólido en suspensión

$Qt$ (l/s)	$V_{tot}$ (l)	$\bar{u}$ (m/s)	$\bar{C}$	$\overline{qss}$ (kg/s)
2.26	1.5	0.442	0.00273	0.00918
2.13	1.5	0.417	0.00584	0.01853
1.96	1.5	0.385	0.00158	0.00463
1.81	1.5	0.355	0.01594	0.04305
2.26	2.0	0.442	0.00008	0.00026
1.96	2.0	0.385	0.00002	0.00007
2.13	2.0	0.417	0.00088	0.00256
1.81	2.0	0.355	0.00233	0.00630
2.26	2.5	0.442	0.00008	0.00027
2.13	2.5	0.417	0.00018	0.00057
1.96	2.5	0.385	0.00021	0.00062
1.81	2.5	0.355	0.00041	0.00110
2.26	3.0	0.442	0.00102	0.00342
2.13	3.0	0.417	0.00068	0.00217
1.96	3.0	0.385	0.00213	0.00623
1.81	3.0	0.355	0.00164	0.00443

En Figura 5-5 se observa que para los experimentos que se incorporó 1.5 l de relave el tomógrafo no fue capaz de representar de buena manera la concentración media, generando así valores elevados en el gasto sólido en suspensión y sus respectivas barras de error. Para los otros experimentos se observa un gasto sólido en suspensión entre 0.043 y 0.103  $kg/s$ , en términos cualitativos se observa que a medida que se incorpora más relave al sistema y aumenta el número de Reynolds, el gasto sólido en suspensión incrementa. El mayor valor de gasto sólido se observa para los casos en que se ingresan 3.0 l de relave al sistema, sin embargo, para el Reynolds 30244 existe una mayor variabilidad de la concentración tanto para el caso de los 2.0 l como de los 3.0 l de relave.

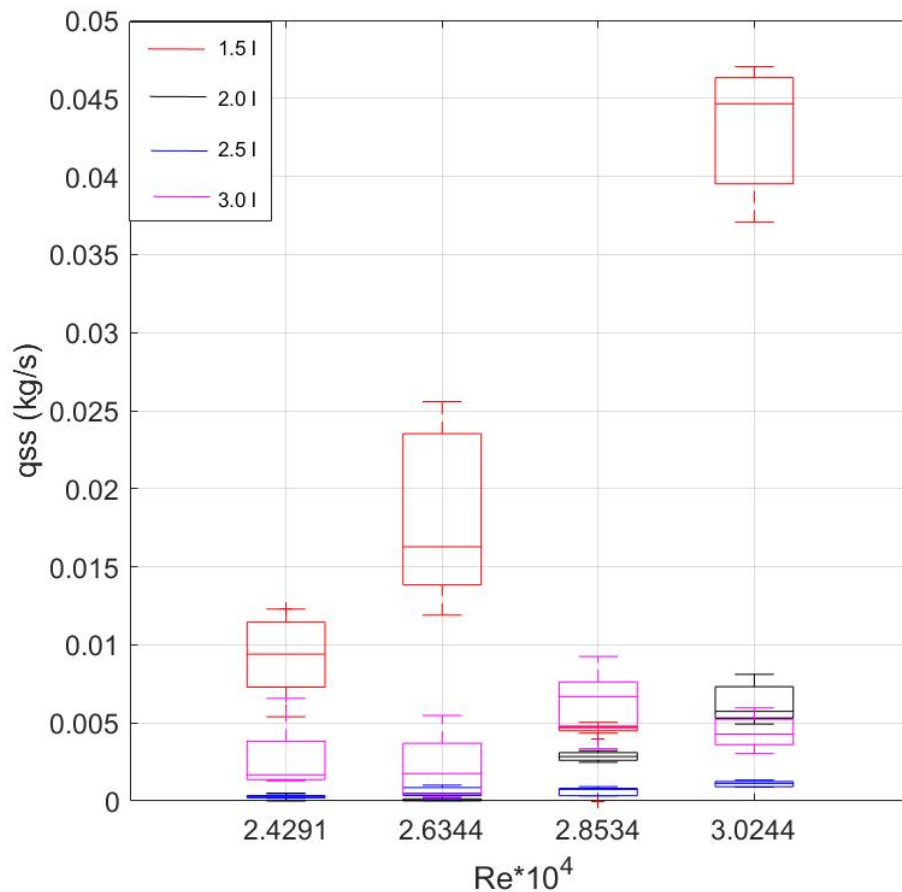


Figura 5-5: Gasto sólido en suspensión para 1.5 l, 2.0 l, 2.5 l y 3.0 l de relave vertido al sistema.

# Capítulo 6 Discusión y Conclusiones

## 6.1. Discusión

### 6.1.1. Montaje experimental

A través del montaje experimental implementado es posible caracterizar visualmente el comportamiento del gasto sólido de fondo y en suspensión, esto gracias al tramo de tubería transparente que permite ver los procesos que se generan en su interior. A su vez el tomógrafo permite caracterizar en forma satisfactoria el transporte de sedimento de fondo, el cual correlaciona de buena forma lo observado con lo medido por el tomógrafo.

Dentro de las limitaciones de la instalación experimental se encuentra la forma de introducir los sedimentos al sistema de tubería, ya que este fue ingresado en forma puntal, lo ideal sería ingresarlo en forma continua y a una tasa constante, ya que al incorporarlo puntualmente se pueden generar diferencias en las mediciones iniciales entre un experimento y otro. Al verterlo en forma controlada se podría analizar en forma más detallada los primeros instantes de las partículas ingresadas al sistema.

El tubo de Venturi para medir caudales dentro de la tubería es bastante preciso y cumple con el objetivo.

### 6.1.2. Instrumentos

Para la obtención de los datos experimentales se utilizó un tomógrafo resistivo que fue capaz de mostrar y coleccionar datos de concentraciones en tiempo real en dos planos transversales de la sección de estudio.

Cualitativamente el tomógrafo representa satisfactoriamente el transporte de sedimentos de fondo y como va variando la concentración en el tiempo, además representa bien las alturas de sedimentos y del lecho. Sin embargo, el sedimento en suspensión no es representado satisfactoriamente en todos los casos, las mejores caracterizaciones son para concentraciones en suspensión mayores a 0.01.

Dentro de las dificultades asociadas al uso del tomógrafo están las estimaciones de las concentraciones cuando existen más de un sedimento o un flujo multifase. No necesariamente la suma de la concentración de grava y partículas de relave es la suma de las concentraciones individuales. Además, los sedimentos utilizados en los experimentos son aproximadamente 25 veces menores al tamaño del pixel del tomógrafo, por lo cual es esperable que genere estas inconsistencias debido a que la resolución del tomógrafo es baja, es decir, un pixel del tomógrafo podría abarcar una porción de una grava y otra de sedimento, que en promedio no representa bien el conjunto de las dos partículas.



### 6.1.3. Metodología experimental

La metodología desarrollada para la medición de concentraciones a través del tomógrafo, permite caracterizar de buena forma la concentración de sedimento de fondo, previo a una calibración donde se comparan las concentraciones medidas por el tomógrafo y las concentraciones reales, de esta forma se puede obtener una ecuación de calibración.

Sin embargo, en el caso de las concentraciones en suspensión, en la cual también existe una calibración asociada. En este caso para algunos experimentos no es capaz de representar en forma satisfactoria el transporte de sedimento en suspensión.

Para caudales mayores a 2.3 l/s el lecho de grava comenzaba a moverse, por lo que está es la principal limitación para el desarrollo de nuevos experimentos asociados a caudales más altos.

De esta forma se puede indicar que, para coleccionar datos a través del tomógrafo, la metodología empleada permite caracterizar la concentración de sedimento de fondo y gasto sólido de fondo en forma indirecta, no intrusiva y de manera satisfactoria.

Para la distribución longitudinal de los sedimentos depositados en los espacios intersticiales del lecho se logra identificar que las partículas de mayor tamaño son las que se depositan principalmente en los tramos iniciales, en comparación con las más pequeñas que se depositan en los tramos finales.

## 6.2. Conclusiones

En la presente tesis se estudió el transporte de distintas concentraciones de relave minero sobre un lecho de grava, con el fin de aportar a los estudios asociados al transporte de sedimentos de ríos por efectos de descarga relaves producto de accidentes mineros, fue cumplido. Así como los objetivos específicos relativos a la generación de una metodología para determinar el gasto sólido de fondo y suspensión, y la cuantificación del relave que queda en el lecho. A través de uso de un tomógrafo resistivo.

En este trabajo se implementó el uso del tomógrafo resistivo ITS, para medir concentraciones de relave de fondo y en suspensión en un lecho de grava inmóvil. Se puede concluir que el tomógrafo es capaz de representar en forma aceptable las concentraciones de relave de fondo. Sin embargo, para el caso de las concentraciones en suspensión, el tomógrafo no logra representarlas de buena manera, esto se puede deber principalmente a que las concentraciones en suspensión son muy bajas, contrastado a su vez con el tamaño del pixel del tomógrafo que es mucho mayor al de la partícula en suspensión.

Por lo tanto, en función de los resultados obtenidos se puede sugerir la implementación del uso de la tomografía para medir el gasto sólido de fondo en ríos. Mientras que para la implementación del gasto sólido en suspensión por tomografía aún requiere mayor investigación.

#### 6.2.1. Metodología experimental

- El montaje experimental desarrollado permitió estudiar el transporte de relave minero sobre un lecho de grava en forma satisfactoria, ya que es posible controlar los caudales del flujo, así como introducir el volumen que uno estime para cada experimento, permitiendo observar instantáneamente el comportamiento de los sedimentos a medida que se desarrolla cada experimento.
- La instalación experimental está asociada a una tubería a presión, que si bien no es la condición ideal para generar una geometría de un canal que permitiría extender de la forma natural el comportamiento de un río, nos permite coleccionar datos en forma no intrusiva a través del tomógrafo resistivo que posee una geometría cilíndrica de tubería. De esta forma podemos ver como varía la concentración de los sedimentos al interior de la tubería y en los espacios intersticiales del lecho de grava, lo que no es posible si la geometría tuviera forma rectangular, ya que la forma del tomógrafo está limitado a una geometría cilíndrica.
- El tomógrafo permite estudiar en forma satisfactoria las concentraciones de relave que sedimentan, previa calibración del sistema.

#### 6.2.2. Estratigrafía

Se puede indicar que el tomógrafo resistivo es capaz de representar cualitativamente de buena forma la posición del relave de cobre en el lecho al interior de la tubería, esto implica que se puede estudiar de forma no intrusiva lo que ocurre con el relave en el lecho obteniendo buenos resultados.

Para la caracterización cuantitativa y cualitativa del relave de cobre en el lecho la referencia agua grava (WG) demuestra ser la más adecuada en comparación a solo la referencia agua (W). Esto dado que, al visualizar la imagen generada mediante el tomograma, se observa de manera similar al visto in situ en la tubería. En términos cuantitativos permite visualizar a mayor detalle las pequeñas variaciones de concentraciones, en comparación a la referencia W donde las pequeñas variaciones no se lograban percibir en detalle.

Las mayores concentraciones del relave obtenidas en el lecho se generan cuando el sedimento vertido es mayor, dado que existe una mayor cantidad de sedimento en el lecho permitiendo de esta forma una mayor concentración de estos en el fondo.

A su vez, se observa que las distribuciones del volumen de sedimento depositado a lo largo del tramo de estudio, donde los sedimentos asociados al  $D_{90}$  se depositan principalmente en el tramo 2 de la zona de estudio. Sin embargo, para el caudal de 1.81 l/s se observa que las partículas de mayor tamaño se encuentran en el tramo 1 de la zona de estudio, esto debido a que la relación  $u_*/w_s \sim 3.1$  mientras que para los caudales mayores la relación es mayor a 3.3.

A medida que avanza el tiempo en los experimentos las partículas de relave de cobre van percolando a través del lecho en forma generalizada, sin observarse un frente de avance como el observado por Niño et. al. (2018).

### 6.2.3. Gasto sólido de fondo

A fin de proveer un mejor ajuste, se deben realizar más experimentos que cubran un mayor amplitud de gasto sólido de fondo y esfuerzos de corte para diferente  $e/D_g$ , esto debido a que la muestra actual es pequeña donde solo abarca algunos rangos de  $e/D_g$ .

El ajuste propuesto para la predicción de gasto sólido de fondo en función del esfuerzo de corte adimensional y el  $e/D_g$ , presentan una tendencia similar a las curvas de gasto sólido clásicas como Meyer- Peter y Müller(1948), Ashida y Michihue (1972) y Engelund y Fredsoe (1976), con algunas diferencias en la relación  $e/D_g$ . De acuerdo a estas curvas el gasto sólido experimental está sobrestimado. Sin embargo, se acoplan bastante bien a los estudios experimentales desarrollados por Fuentes (2017) y Niño et al. (2018).

Se puede identificar que a mayores valores de  $e/D_g$  el esfuerzo de corte adimensional va disminuyendo, esto principalmente se puede ver debido a la disminución de la rugosidad del lecho, a medida que el relave va sedimentando. Esto se observa principalmente para los casos donde el volumen de sedimento ingresado al sistema es de 3.0 l. donde el lecho se encuentra prácticamente cubierto en su totalidad.

No se genera una curva de predicción de gasto sólido, debido a que no sería funcional, ya que el rango de resultados es muy acotado, donde adicionalmente sería necesario realizar correcciones al esfuerzo de corte que no se ha cuantificado a medida que se modifica la rugosidad del lecho.

### 6.2.4. Gasto sólido en suspensión

Fue posible calcular el gasto sólido en suspensión para los experimentos, sin embargo, en algunos casos el tomógrafo no detecto partículas en suspensión, esto se debe principalmente a la resolución espacial que posee el tomógrafo resistivo, donde se puede indicar que en algunos casos no es capaz de identificar partículas tan pequeñas. A su vez el tomógrafo en algunos casos confunde concentraciones de sedimento con burbujas que se encuentran pasando por la tubería.

El mayor valor de gasto sólido se observa para los casos en que se ingresan 3.0 l de relave al sistema, sin embargo, para el Reynolds 30244 existe una mayor variabilidad de la concentración tanto para el caso de los 2.0 l como de los 3.0 l de relave.

Con respecto al umbral de incorporación de las partículas en suspensión propuesta por Bagnold (1966), Van Rijn (1984) y Niño et al. (2003), se puede concluir que el umbral de Niño et al. (2003) sobrestima los valores de incorporación para  $D_{50}$ , mientras que para diámetros característicos mayores, el umbral de incorporación fue validado.

Adicionalmente no se pudo validar el modelo de Rouse cuando las concentraciones de sedimento en suspensión son bajas. Mientras que en el caso de volúmenes de incorporación mayores, el modelo se ajusta relativamente bien, identificando mayores concentraciones a  $0.2 z/h$ . En algunos casos se observan valores elevados de concentración en  $\frac{z}{h} \sim 1$ , esto se debe principalmente a las burbujas existentes en la parte superior de la tubería, que son tomadas como concentraciones por parte del tomógrafo.

## Bibliografía

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

Alejo B., Barrientos A. (2009). Model for yield stress of quartz pulps and copper tailings. *International Journal of Mineral Processing*. 93, pp 213-219

Apell para Minería (2004). “Guía para la industria minera a fin de promover la concientización y preparación para emergencias a nivel local”. ISBN 85-72-27-197-X.

Brevis., W., & Niño., Y. (2014). Velocimetría por rastreo de Partículas. *Experimental Methods for Hydraulics*, International Association of Hydraulics Research (Submitted, in review).

Czernuszenko, W. (2011). Spatially Averaged Log-Law for Flows over Rough Bed in Zero- and Non-Zero-Pressure Gradient Boundary Layers. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 58(1-4), 65-86.

Delgado F. (2015). Experto y presencia de relaves en el norte: “Si niveles son muy tóxicos, debería evacuarse el lugar” [en línea] *Bio bio Chile Internet*. 7 de abril, 2015 <<http://www.biobiochile.cl/2015/04/07/experto-y-presencia-de-relaves-en-el-norte-si-niveles-son-muy-toxicos-deberia-evacuarse-el-lugar.shtml>>[consulta:29-09-2015].

Coulthard T., Macklin M. (2003), "Modeling long term contamination in river systems from historical metal mining. *Geological Society of America*. v 31, N°5, p 451-454.

Dimitrova R., Yanful E.(2011). Factors affecting the shear strength of mine tailing/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. *Engineering Geology*, 125, pp11-25.

DTSC (2006), Abandoned mine lands site discovery process, California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control.

Petticrew E., Albers S., Baldwin S., Carmack E., Déry S., Gantner N., Graves K., Laval B., Morrison J., Owens P., Selbie D., Vagle S.(2015). The impact of a catastrophic mine tailings impoundment spill into one of North America's largest fjord lakes: Quesnel Lake, British Columbia, Canada. *Geophysical research letters*, 42, doi:10.1002/2015GL063345.

Engelund, F., & Fredsoe, J. (1976). A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. *Nordic Hydrology*, 7, 293-306.

Giguere R., Fradette L., Mignon D., Tanguy P.(2008) ERT algorithms for quantitative concentration measurement of multiphase flows, *Chemical Engineering Journal* 141 , 305-317.

Giguere R., Fradette L., Mignon D., Tanguy P. (2008) Characterization of slurry flow regime transition by ERT, *Chemical Engineering Journal* 86 , 989-996.

Hardy R. Best J., Lanr S., Carbonneau E. (2009). Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The role of near-bed turbulence and influence of Reynold number. *Journal o Geophysical Research*. V 114, F01003.

ITS (2013). ITS System 2000 Version 7.3, p2+ EElectrical Resistance Tomography System- User's Manual.

Kironoto, B. A., & Graf, Walter H. (1994, Dec). Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, 106, 333-344.

Kuhnle R., Wren D., Langendoen e., Rigby J. (2013). Sand transporto ver an immobile gravel substrate. *Journal of hydraulic engineering*, 2013.139:167-176.

Maerz N., Palangio T., Franklin J. (1996). Wipfrag Image Based Granulometry System. *Proceedings of Fragblast 5 workshop on measurement of Blast Fragmentation*, Montreal, Quebec, Canada 23-24 Aug., 1996, pp 91-99.

Musalem, R. (1999). Medición de Campos de Velocidades Instantáneas en Canales mediante Procesamiento de Imágenes. Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Nezu, I., & Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows. *IAHR Monograph series*, A.A. Balkema, Rotterdam.

Nikora, V., & Goring, D. (2000). Flow turbulence over Fixed and Weakly Mobile Gravel Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 679-690.

Niño, Y., & Gracia, M. (1998, October). Experiments on Saltation of Sand in Water. *Journal of Hydrualic Engineering*, 124, 1014-1025.

Niño, Y., (2013), Apuntes del curso de Transporte Hidráulico de Sólidos

Niño, Y., Licanqueo, William., & Tamburrino, Aldo. (2017). Front of sand moving as bedload through immobile coarse gravel. *Journal of Hydraulic Research*.

Prasad., A. K. (2000). Particle Image Velocimetry. *Current Science-Bangalore*, 79(1), 51-60.

Pedocchi F., Martin J. Garcia M. (2008). Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in fluid*, V 45, I 1, p 183-186.

Petticrew E., Albers S., Baldwin S., Carmack E., Déry S., Gantner N., Graves K., Laval B., Morrison J., Owens P., Selbie D., Vagle S. (2015). The impact of a catastrophic mine tailings impoundment spill into one of North America's largest fjord lakes: Quesnel Lake, British Columbia, Canada. *Geophysical research letters*, 42, doi:10.1002/2015GL063345.

Ronald J, Adrian. (1991). Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Fluid Mechanics*, 23, 261-304.

Ronald. J., A. (1991). Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.

Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). Pivlab-Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in Matlab. *Journal of Open Research Software*, 2(1), :e30.

Qiu C., Bagatin R., Palmery S., Bolton G.T., (2007), On line visualization of asymmetric multi-phase flow in an industrial flow loop applying multi-modality process tomography system, 5th World Congress on Industrial Process Tomography, 3-6 September 2007, Bergen, Norway.

Onemi (2015). "Análisis Multisectorial Eventos 2015- Evento Hidrometeorológico Marzo-Terremoto/Tsunami Septiembre"

Reinecke N., Petrisch G., Schmitz D., Mewes D. (1998) Tomographic measurement techniques. *Visualization of Multiphase Flows*. *Chem Eng. Technol.* 21, 1.

Rico M., Benito G., Salgueiro A., Diez-Herrero A., Pereira H. (2008). Reported tailing dam failures: A review of the European incidentes in the worldwide context. *Journal of Hazardous materials*, V 152, I 2, April 2008, P 846-852.

Saomoto H., Matsushima T., Yamada Y. (2007). Visualization of particle- fluid system by laser-aided tomography, Hoe I. Ling et al. (eds), *Soils stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, 235-242.

Sernageomin. (2015). "Catastro nacional de depósitos de relave; Depósitos activos y no activos 2015". Departamento de depósito de relaves.

Vargas V. (2007). Sindicatos mineros, sobrevivientes y familiares recordaron la muerte de 300 personas. [en línea] *El Mercurio Valparaiso internet*. 2 de abril 2007. <[http://www.mercuriovalpo.cl/prontus4\\_noticias/site/artic/20070402/pags/20070402043830.html](http://www.mercuriovalpo.cl/prontus4_noticias/site/artic/20070402/pags/20070402043830.html)> [consulta: 29-09-2015].

Westerweel., J. (1993). *Digital Particle image Velocimetry*. Delft University, 17-18.

# Anexos



# ANEXO A: PIV

## *Información experimental*

En esta memoria se implementó la técnica PIV para caracterizar el campo de velocidades del flujo dentro de la tubería.

Para la implementación de PIV, se utilizó en la tubería un contenedor de  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ , con agua el cual permite observar la tubería como si fuera un área transversal rectangular y evitar los efectos curvos de la tubería. El área se iluminó con un láser de línea flex provee el haz de luz, siendo un láser de tipo continuo con una longitud de onda de 532 nm, de buena estabilidad energética y baja señal de ruido. El plano láser es generado por un lente colimador ubicado cerca del origen de la señal de luz. Para la grabación se utilizó una cámara de alta velocidad PHOTRON Fastcam SA3, que es capaz de grabar, 2.72 s a una frecuencia de muestreo de 1000 fps.

A continuación, en la Figura A- 1se representa una imagen de la instalación experimental.

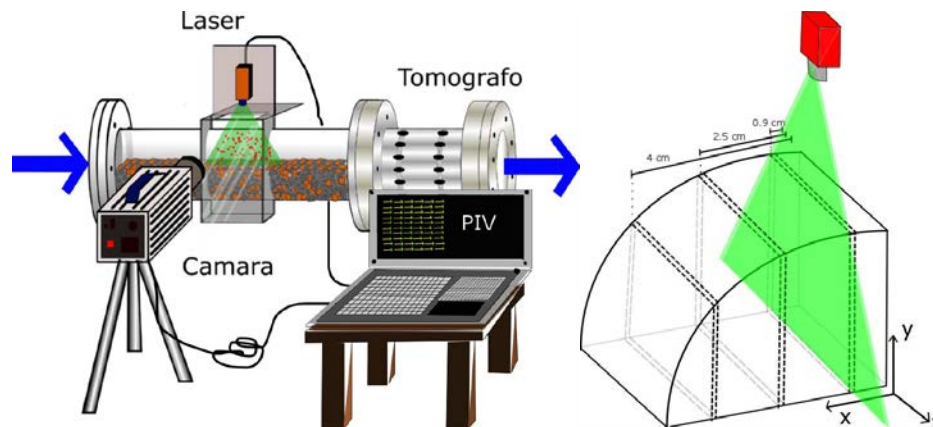


Figura A- 1. Montaje experimental para velocimetría (Fuentes 2017).

Los experimentos se realizaron con el flujo de agua circulando en el sistema, donde se establece un caudal de trabajo estable. Teniendo esto en cuenta se instala la cámara en posición fija, y el láser encendido y posicionado en uno de los planos en forma paralela a la dirección del flujo. Una vez posicionada la instrumentación se agregan las partículas de plástico de orden de  $75 \mu\text{m}$ , que reflejan ante la luz del láser, de acuerdo a la metodología utilizada por Pedochi et al (2008). Una vez las partículas están circulando, se enfoca la cámara y se realiza la filmación por un tiempo determinado de 5 segundos por plano, realizando esto para 3 planos.

Las imágenes son preprocesadas con el objetivo de mejorar la precisión de los resultados, posteriormente se selecciona la región que se utilizará de la imagen obteniendo los vectores de velocidad del flujo, los cuales son sometidos a validación e interpolación (Fuentes 2017).

A continuación, se observa la imagen de un experimento de velocimetría mediante el software PIVlab donde se observan los vectores de velocidad del flujo.

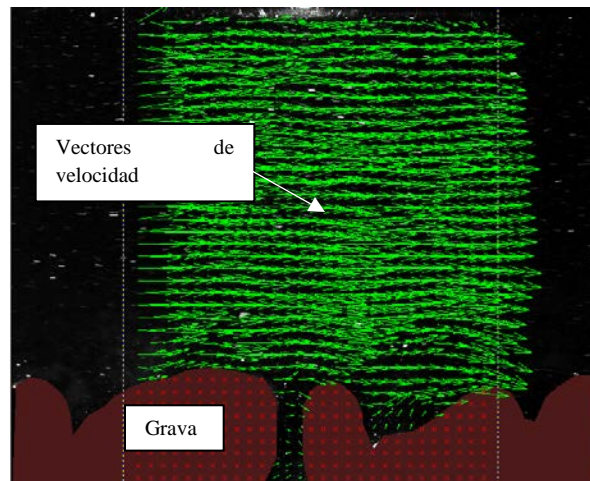


Figura A- 2. Vectores de velocidad calculados mediante PIVlab (Fuentes 2017).

Los errores asociados a la técnica PIV fueron determinados en base a la guía ITTC (2008), el error asociado a la velocidad para cada plano esta del orden de 3 cm/s (Fuentes 2017).

#### *Intensidad de la turbulencia*

La intensidad de la turbulencia se define como la razón entre el valor cuadrático medio de la fluctuación de la velocidad sobre la velocidad de corte, donde la velocidad de corte corresponde a la obtenida a través del esfuerzo de corte de Reynolds, los cuales a su vez fueron comparados con las expresiones semiteóricas de Nezu y Nakagawa (1993) y Kironoto y Graf (1994):

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i'^2}$$
$$v_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i'^2}$$

### *Esfuerzo de Corte mediante PIV*

El esfuerzo de corte total corresponde a la suma de los esfuerzos viscosos, espaciales y turbulentos, los cuales fueron adimensionalizados por  $\rho g R D_s$  representados como:

$$\tau_{Total}^* = \tau_v^* + \tau_{esp}^* + \tau_{tur}^*$$

donde:

$D_s$  : diámetro de la grava

$\rho$ : densidad del agua

$\rho_s$ : densidad del sedimento

$R = (\rho_s - \rho) / \rho$

Según Nikora y Goring (2000) el límite de la capa rugosa se ve reflejado a través del valor máximo del esfuerzo de corte. Además, la reducción del esfuerzo de corte cercana al lecho se debe a mecanismos de extracción de momentum asociados con la heterogeneidad espacial de las condiciones medias del flujo en torno al lecho, esto visto en la literatura principalmente por Nikora et al. (2004), Czernuszenko (2011), Florens et al. (2013), Nikora et al. (2001). Se consideran que los resultados son válidos solo hasta un 0.1-0.25  $d_s$ , que es donde está la rugosidad física determinada.

# ANEXO B: Calibración tubo de Venturi

## *Instalación experimental Venturi*

La instalación experimental para la calibración del Venturi consiste en un estanque plástico de 150 litros graduado, 4 metros de manguera de 2 pulgadas, tubo Venturi, bomba centrífuga, válvula de compuerta, sentina de laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, válvula de aspiración, manómetro de mercurio y agua.

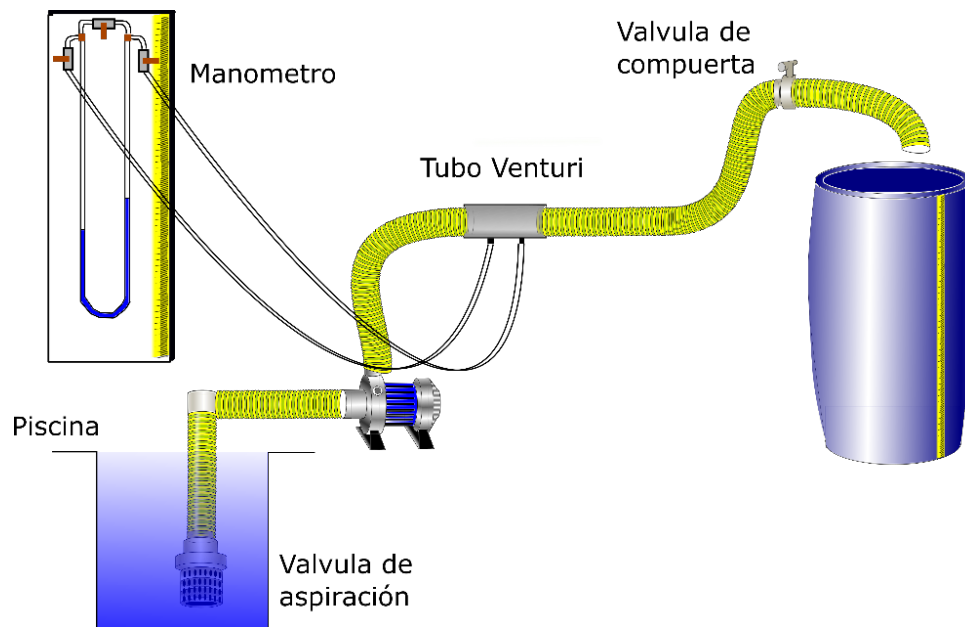


Figura A- 3:Instalación experimental calibración ( Fuentes 2017).

## *Metodología*

Previo a la realización de la calibración se hace necesario cebar 1.8 metros de manguera correspondiente a la altura de impulsión de la bomba. En la sentina se instala la válvula de aspiración que permite mantener la presión del agua una vez que el sistema se apaga.

Una vez cebado el sistema, en cada variación de presión que se observa en el tubo Venturi, se procede a aforar a través del estanque de 150 litros. Para cada variación de presión se afora 3 veces, teniendo en cuenta acumular más de 100 litros y tiempos mayores a 1 minutos, los que posteriormente se promedian. La variación de presión se obtiene mediante el promedio de 3 registros fotográficos del manómetro en diferentes instantes de tiempo.

De acuerdo al principio de Bernoulli y continuidad se tiene que:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

donde  $V_1, P_1, Z_1$ , corresponden a la velocidad, la altura de presión y la cota de referencia al inicio de la entrada del tubo, así como  $V_2, P_2, Z_2$  corresponde a las variables de salida del tubo.

Mediante los datos obtenidos usando agua y mercurio se obtiene una regresión potencial, con un error asociado de  $\pm 0.03$  l/s.

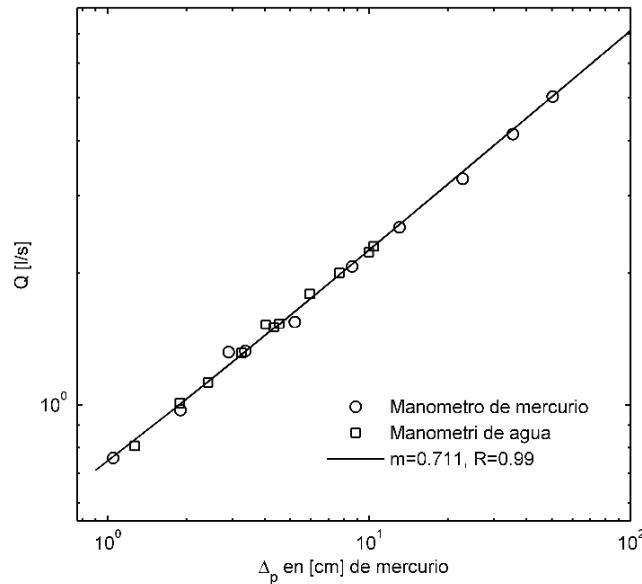


Figura A- 4: Regresión potencial en plano logarítmico entre caudal y variación de presión.

#### Calibración Tubo Venturi

La calibración del tubo venturi consiste en encontrar una relación entre el caudal y la variación de presión generada en el tubo Venturi. Mediante un manómetro de mercurio y/o agua es posible encontrar el caudal del sistema asociado a la diferencia de alturas del mercurio en el manómetro. La relación entre el caudal y la variación de presión se deduce igualando la energía entre la entrada y angostamiento en el tubo de venturi, de acuerdo a los principios de Bernoulli y continuidad.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Combinando las ecuaciones se obtiene la relación de caudal asociado a la diferencia de presión.

$$Q = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)}}$$

donde  $V_1, P_1, z_1$  que corresponde a la velocidad, altura de presión y cota de referencia a la entrada del tubo, y  $V_2, P_2, z_2$ , son las variables en la salida del tubo.