

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo

**RESISTENCIA HIDRÁULICA EN FLUJOS DE SUCESIÓN
RÁPIDO-POZÓN: APROXIMACIÓN FÍSICA EN LECHO FIJO**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil

IVÁN ALEJANDRO RIVAS SOTO

Concepción, Diciembre 2016

Contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCION	8
1. Objetivos	12
1.1. Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. MARCO TEORICO	13
2.1 Glosario:	13
2.2. Análisis Dimensional	14
2.3. Número de Froude	17
2.4. Pérdidas de energía	18
3. METODOLOGIA	20
3.1 Caracterización Geométrica e Hidráulica de los ríos de la región del Bío Bío.	20
3.1.1 Estimar los parámetros geométricos de los ríos de la región del Bío Bío.	20
3.1.2 Estimar los parámetros de hidráulicos de los ríos de la región del Bío Bío.	22
.....	22
3.2. Implementar un modelo físico a escala reducida de la sucesión rápido-pozón representativo de ríos de la región del Bío Bío.	22
3.2.1. Selección de Escala	23
3.2.2. Modelo y Semejanza Hidráulica	24
3.2.4. Componentes del sistema de medición y variables a medir	27
3.2.5. Tratamiento de la información.	32
3.2.6. Ensayos experimentales	32
3.3. Evaluar las características geométricas e hidráulicas de la sucesión rápido-pozón construida de los ríos de la región del Bío Bío a escala reducida con lecho fijo.	35
3.3.1. Software a modelación hidráulica	35
2.3.2. Sistema de unidades	35
3.3.3. Sección transversal y perfil longitudinal del terreno.	35
3.3.4. Datos Hidráulicos de flujo en régimen permanente.	36
3.3.5. Condiciones de Borde o Contorno.	36
3.3.6. Ejecutar simulación	36

3.3.7. Comparación de ejes hidráulicos.	37
3.3.8. Intervalos de confianza	37
3.3.9. Números de Froude y Reynolds.	37
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
4.1. Resumen Parámetros geométricos	38
4.2. Resumen Parámetros hidráulicos	39
4.3. Resultados ensayos experimentales	40
4.4. Caracterización del tipo flujo	43
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5.1. Conclusiones.....	45
5.2. Recomendaciones	46
REFERENCIAS.....	47
ANEXO A.....	49
Parámetros Geométricos e Hidráulicos	49
ANEXO B.....	55
Modelo a escala	55
ANEXO C.....	63
Protocolo calibración canal de laboratorio.....	63
ANEXO D.....	67
Protocolo calibración y códigos de software	67
ANEXO E	75
Resultados.....	75
ANEXO F	84
Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales	84

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Esquema ríos de gran pendiente y su relación con la sucesión rápido-pozón	9
Figura N° 2 Tipos de lecho para ríos de montaña. (Montgomery y Buffington, 1997)	14
Figura N° 3 Esquema conservación de energía en canales (Ven Te Chow, 1994)	19
Figura N° 4 Fotografía aérea sucesión rápido-pozón	21
Figura N° 5 Perfil de elevación.	21
Figura N° 6 Esquema del canal de laboratorio.....	26
Figura N° 7 del rápido construido en el canal.	27
Figura N° 8 Sucesión rápido-pozón representativa	40
Figura N° 9 Zona de pérdidas de energía.....	41
Figura N° 10 Alturas medidas vs Alturas calculadas.	43
Figura N° 11 Grafico Número de Froude vs Número de Reynolds.	44

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 dimensiones de las variables a analizar.	15
Tabla N° 2 Relación de escalas para los parámetros geométricos e hidráulicos.....	24
Tabla N° 3 Parámetros geométricos río promedio vs canal en escala 1:200.....	25
Tabla N° 4 Caudales entregados por las bombas y llave de laboratorio	25
Tabla N° 5 Caudales a escala que se ensayaron.....	26
Tabla N° 6 Correcciones de altura para cada regla de medición.....	29
Tabla N° 7 Como generar los caudales ensayados.....	34
Tabla N° 8 Parámetros geométricos promedio.	38
Tabla N° 9 Parámetros hidráulicos para diferentes períodos de retorno en m ³ /s.	39
Tabla N° 10 Intervalos de confianza en mm	41
Tabla N° 11 Porcentaje de pérdidas de energía por zonas de una sucesión rápido-pozón.....	42

RESISTENCIA HIDRÁULICA EN FLUJOS DE SUCESIÓN RÁPIDO-POZÓN: APROXIMACIÓN FÍSICA EN LECHO FIJO

Autor: Iván Rivas Soto

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: ivanrivassoto@gmail.com

Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: lsantana@ubiobio.cl

RESUMEN

El presente informe muestra la incidencia de la resistencia hidráulica en la sucesión rápido-pozón para los ríos de la región del Bío Bío, mediante ensayos experimentales llevados a cabo en el canal de laboratorio de la Universidad del Bío Bío.

Esta investigación comprende un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica y revisión cartográfica hasta el procesamiento de los datos geométricos e hidráulicos obtenidos en la investigación, propuesta y elaboración de modelo físico en lecho fijo de un río modelo y análisis de los resultados que permiten integrar todas las variables comprendidas en el modelo.

Se realizaron 10 ensayos experimentales con 6 repeticiones de sucesión rápido-pozón cada una, se obtuvieron 270 mediciones de altura de escurrimiento con lo cual permitió establecer una sucesión rápido-pozón tipo para diferentes caudales, con las alturas de escurrimiento de la sucesión rápido-pozón tipo se realizaron los análisis que permitieron determinar las velocidades del flujo, regímenes de flujo, pérdidas de carga presentes en el modelo.

Del trabajo realizado se concluye que la sucesión rápido-pozón es una estrategia de disipación de energía de la cual las principales pérdidas de carga se producen debido al fenómeno de resalto hidráulico que ocurre al producirse las transiciones de torrente a río. Disminuyendo el porcentaje de pérdida de carga con respecto a la energía específica a medida que el caudal aumenta.

Palabras Claves: Rápido-Pozón, resistencia hidráulica, modelo físico, pérdidas de carga.

6823 Palabras Texto + 19 Figuras/Tablas*125+ 3 Figuras/Tablas*250= 9948 Palabras

HYDRAULIC RESISTANCE IN FLOWS SUCCESSION RIFFLE AND POOL: PHYSICAL APPROACH IN FIXED BED

Author: Iván Rivas Soto

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: ivanrivassoto@gmail.com

Advisor: Luis Santana Oyarzo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: lsantana@ubiobio.cl

ABSTRACT

This report shows the incidence of hydraulic resistance in succession riffle-pool for the rivers of the region of Bío Bío, through experimental trials carried out in the laboratory of the Universidad del Bío Bío channel.

This research includes a progressive development of different stages which starts from the bibliographical collection and cartographic review until the processing of the geometric and hydraulic data obtained in the investigation, proposal and development of physical model in fixed bed of a river model and analysis of the results that allow you to integrate all of the variables included in the model.

Were 10 experimental trials with 6 replications of succession fast-pool each, were 270 measurements of height of runoff in which allowed to establish a succession fast-pool type for different flows, with runoff from the succession heights fast-pool type were conducted analyses that allowed to determine rates of flow, flow regimes, losses of load present in the model.

The work concludes that the succession fast pool is a strategy energy dissipation which lost major load occur due to the phenomenon of hydraulic boss that occurs when transitions from river to River. Decreasing the percentage of loss of charge energy specifies the flow increases.

Keywords: Riffle-Pool, hydraulic resistance, physical model, loss of load.

INTRODUCCION

La sucesión rápido-pozón se define como una estrategia de disipación de energía en ríos de gran pendiente.

Los rápidos se producen en los tramos que presentan pendientes locales altas (mayores a la pendiente promedio) y presentan una velocidad alta en el flujo. Se forman en zonas de poca profundidad por presencia de materiales más gruesos, tales como depósitos de grava. Son fácilmente reconocibles a simple vista por presentar zonas blancas con espuma y remolinos.

Los pozones se producen en los tramos que presentan pendientes locales bajas en comparación con la pendiente promedio y en zonas de contra pendiente. En estos tramos se presentan velocidades bajas en el flujo y se forman en zonas más profundas y más tranquilas cuyo lecho (en general) se compone de un material más fino, como el limo (Lisle, 1979).

Los ríos de gran pendiente se definen como ríos con pendientes altas, elevadas velocidades y donde predominan la erosión y el transporte de material. Se componen de tres tipos de río los cuales son los ríos de montaña, ríos meandricos y ríos trenzados (Gracia-Maza, 2009), los cuales abarcan toda la zona central hasta la zona austral de Chile.

Los ríos de gran pendiente forman la sucesión rápido-pozón debido a la fricción que se produce entre el fluido y el lecho, este fenómeno es conocido como resistencia hidráulica.

La resistencia hidráulica relaciona las características geométricas con el flujo las que al interactuar producen cambios en las formas del lecho a través del tiempo debido al arrastre de sedimentos y la tasa de sedimentación, estos cambios producen un equilibrio dinámico a largo plazo conocido como lecho móvil en donde se igualan las tasas de arrastre con las tasas de sedimentación.

Debido a que la condición de lecho móvil es una condición de largo plazo, en el corto plazo se producen formas de lecho específicas las cuales pueden ser asemejadas al lecho fijo.

Una de estas formas específicas se conoce como forma de pozos y rápidos la cual consiste en que en el lecho del río se forman zonas de pendientes locales más fuertes que la

pendiente promedio y zonas de pendiente suave, nula o incluso contrapendiente lo cual genera el punto de máximo desarrollo de la sucesión rápido-pozón.

Debido a los cambios de régimen que se producen en el flujo para adaptarse a las formas del lecho, se producen la aparición de crestas, espuma y resaltos hidráulicos los cuales sirven como disipadores de energía de la sucesión rápido pozón. Esto nos indica que la condición de rápido no es estable ni prolongada en el tiempo debido a la condición de lecho deformable y móvil.

La Figura N°1 muestra un esquema como se relacionan los ríos de gran pendiente, la resistencia hidráulica y la sucesión rápido pozón a las pérdidas de energía:

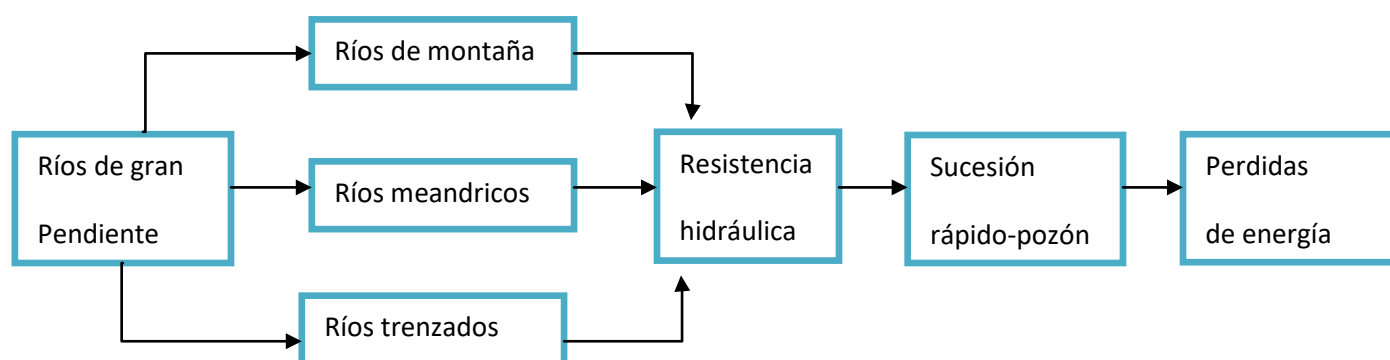


Figura N° 1 Esquema ríos de gran pendiente y su relación con la sucesión rápido-pozón

Los cambios en los regímenes locales del flujo generan zonas donde se deposita el material y provoca erosión sucesiva del material del lecho, lo que puede modificar drásticamente la geometría de la sección y en el peor de los casos, un cambio en el trazado del curso principal del cauce frente a la ocurrencia de eventos de crecidas extraordinarias (Howard, 2009). Los cambios en el trazado del curso del río pueden conducir a problemas de inundación en zonas aledañas a estos ríos como lo son pueblos o zonas de cultivo causando pérdidas económicas, materiales y humanas.

La sucesión rápido pozón no posee estudios en Chile, sin embargo si cuenta con estudios en Estados Unidos en su condición de lecho móvil donde se han enfocado principalmente a determinar coeficientes de fricción debido a que con el constante movimiento de

sedimentos y los cambios de regímenes de escurrimiento este valor presenta variaciones a través del tiempo.

Debido a que la sucesión rápido pozón se presenta en lechos deformables y móviles depende de una gran cantidad de variables involucradas como son: Ancho del cauce, Largo del cauce, Altura de escurrimiento, Velocidad del flujo, Coeficiente de rugosidad, Gravedad, Densidad del fluido, Esfuerzo cortante, Tasa de sedimentación, Arrastre de sedimentos y el Tiempo.

Como el estudio de la sucesión rápido pozón sugiere gran complejidad debido al número de variables que intervienen directamente en el problema nos centraremos únicamente en la relación entre las características geométricas e hidráulicas para ello simplificaremos el problema eliminando la condición de variable en el tiempo, es decir se trabajara en la condición de lecho fijo la cual nos permite eliminar 3 variables del estudio como el tiempo, tasa de sedimentación y arrastre de sedimentos.

De esta manera las variables que intervienen en la sucesión rápido pozón en el caso de lecho fijo son: $f(a, h, l, v, n, g, \rho, \tau)$ las cuales mediante un análisis dimensional se logro obtener que la sucesión rápido pozón se relaciona directamente con el N° de Froude, pendiente de la línea de energía, coeficiente de fricción adimensional.

Para lograr caracterizar la sucesión rápido pozón para los ríos de la región del Bío Bío se procedió a obtener las características geométricas e hidráulicas de los ríos de la región del Bío Bío los cuales presentan una alta dispersión en sus características por lo que se propuso un modelo de la sucesión rápido pozón utilizando las características promedio de los ríos de la región, el modelo propuesto fue construido en el canal de laboratorio de la Universidad del Bío Bío y dicho modelo a escala propuesto se ensayo para diferentes caudales.

Mediante un estudio estadístico utilizando los intervalos de confianza t-student para una confianza del 95% se determino que todos los valores de altura de escurrimiento obtenidos en cada sucesión rápido pozón se encontraban dentro de dichos intervalos por lo que se caracterizo una sucesión rápido pozón tipo.

Además se obtuvieron los porcentajes asociados a las pérdidas de carga que se producen debido a la sucesión rápido pozón para los diferentes caudales.

Entre las conclusiones más destacadas obtenidas del estudio se encuentran que las pérdidas de energía producidas por la sucesión rápido pozón disminuyen a medida que aumentan los valores de caudales.

Luego, en el presente proyecto de título se entrega a una metodología experimental que aporta información de la sucesión rápido-pozón en ríos de gran pendiente en la región del Bío Bío en condición de lecho fijo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

- Analizar las características geométricas e hidráulicas de la sucesión rápido-pozón mediante la modelación física en lecho fijo representativa de los ríos de la región del Bío Bío.

1.2 Objetivos específicos

- Definir y estimar las características geométricas e hidráulicas de los ríos de la región del Bío Bío.
- Implementar un modelo físico a escala de la sucesión rápido-pozón representativo de los ríos de la región del Bío Bío.
- Evaluar las características geométricas e hidráulicas de la sucesión rápido-pozón construida de los ríos de la región del Bío Bío a escala reducida con lecho fijo.

2. MARCO TEORICO

2.1 Glosario:

- **Ancho del cauce (a):** Se llamara ancho del cauce a la dimensión transversal a la dirección del flujo del río.
- **Ancho inundación del cauce (A.i):** Se llamara ancho de inundación del cauce a la dimensión transversal a la dirección del flujo del río incluyendo las zonas inundables en eventos de crecidas extraordinarias.
- **Largo del tramo (l):** Corresponde a la dimensión longitudinal del río.
- **Pendiente longitudinal (s):** Es la inclinación promedio del tramo del rio que presenta el rio con respecto de un nivel horizontal.
- **Caudal (Q):** Volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados.
- **Caudal máximo instantáneo (Q_{mi}):** Es el máximo caudal obtenido en algún instante de tiempo en un año.
- **Altura de escurrimiento (h):** Dimensión vertical del flujo del rio medido desde el punto más bajo del fondo del lecho.
- **Rugosidad (n):** Es el coeficiente de rugosidad de Manning, depende del material.
- **Perdida de carga (ΔE):** Son las pérdidas de energía entre 2 puntos del rio, y son producidas tanto por la fricción del fluido con el lecho como por los resaltos hidráulicos.

Debido a la condición de lecho móvil los ríos de montaña presentan diferentes formas de lecho a lo largo del tiempo las cuales se dividen en 5 tipos diferentes categorizados por Montgomery y Buffington.

A continuación en la Figura N°2 se presentan las formas de lecho de los ríos de montaña.

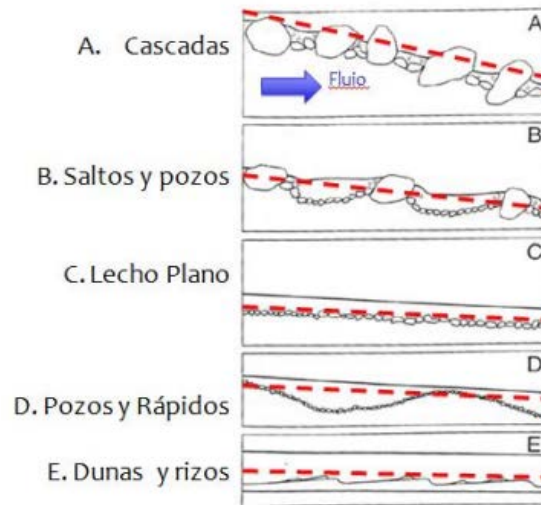


Figura N° 2 Tipos de lecho para ríos de montaña. (Montgomery y Buffington, 1997)

De las cuales se utilizó la forma de lecho tipo D para la propuesta de modelo la cual es conocida como pozos y rápidos y consiste en tramos con pendientes locales fuertes y contra pendientes.

2.2. Análisis Dimensional

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico dado a través de parámetros adimensionales apoyados por la experimentación.

Permite proporcionar antecedentes para el estudio de modelos a escala, por medio de los cuales se pueden resolver problemas de diseño de muy complejo análisis y/o resolución.

En el caso de la sucesión rápido-pozón depende de 11 variables las cuales son: Ancho del cauce (a), Largo del cauce (l), Altura de escurrimiento (h), Velocidad del flujo (v), Coeficiente de rugosidad (n), Gravedad (g), Densidad del fluido (ρ), Esfuerzo cortante (τ), Tasa de sedimentación (T.S), Arrastre de sedimentos (A.S), Tiempo (t). Para la condición de largo plazo (lecho móvil).

Para la condición de corto plazo (lecho fijo) la sucesión rápido pozón elimina la variable del tiempo debido a que no considera cambios en la forma del lecho a través del tiempo, tampoco se consideran el arrastre de sedimentos y tasa de sedimentación reduciendo la complejidad del problema a 8 variables.

$$\Delta E \text{ (Perdida de carga)} = f(a, h, l, v, n, g, \rho, \tau)$$

Utilizando el Teorema π de Buckingham se obtendrán las ecuaciones para los parámetros adimensionales.

Para realizar el análisis dimensional en la Tabla N°1 se muestran las dimensiones de las variables que participan en la sucesión rápido pozón.

Tabla N° 1 dimensiones de las variables a analizar.

Cantidad	Símbolo	Dimensiones
Largo	l	L^1
Ancho	a	L^1
Altura escurrimiento	h	L^1
Velocidad	v	$L^1 T^{-1}$
Coeficiente de rugosidad	n	$L^{-1/3} T^1$
Gravedad	g	$L^1 T^{-2}$
Densidad	ρ	$L^{-3} M^1$
Esfuerzo cortante	τ	$L^{-1} M^1 T^{-2}$

$n=8$; $m=3$ (L, M, T)

Numero de ecuaciones: $8-3 = 5$

Como $m = 3$, corresponde elegir el mismo número de variables que se repiten y que entre sí contengan las respectivas dimensiones. Para este caso se elegirán: v , h , ρ y se estructurarán las ecuaciones para los parámetros adimensionales.

$\pi_1 = h^{a1} * \rho^{b1} * v^{c1} * a$ $\pi_1 = L^{1a} * L^{-3b} * M^{1b} * L^{1c} * T^{-1c} * L^1$ <p>L: $a - 3b + c + 1 = 0 \Rightarrow a = -1$</p> <p>M: $b=0$</p> <p>T: $c=0$</p> $\pi_1 = \left(\frac{a}{h}\right)$
$\pi_2 = h^{a2} * \rho^{b2} * v^{c2} * l$ $\pi_2 = L^{1a} * L^{-3b} * M^{1b} * L^{1c} * T^{-1c} * L^1$ <p>L: $a - 3b + c + 1 = 0 \Rightarrow a = -1$</p> <p>M: $b=0$</p> <p>T: $c=0$</p> $\pi_2 = \left(\frac{l}{h}\right)$
$\pi_3 = h^{a3} * \rho^{b3} * v^{c3} * n$ $\pi_3 = L^{1a} * L^{-3b} * M^{1b} * L^{1c} * T^{-1c} * L^{-1/3} * T^1$ <p>L: $a - 3b + c - 1/3 = 0 \Rightarrow a = -2/3$</p> <p>M: $b=0$</p> <p>T: $-c=$</p> $\pi_3 = \left(\frac{n*v}{h^{2/3}}\right) \Rightarrow \text{de ecuación de Manning}$ $\pi_3 = (S^{1/2}) = (S) = \text{Pendiente línea de energía}$

$\pi_4 = h^{a4} * \rho^{b4} * v^{c4} * g$ $\pi_4 = L^{1a} * L^{-3b} * M^{1b} * L^{1c} * T^{-1c} * L^1 * T^{-2}$ <p>L: $a - 3b + c + 1 = 0 \Rightarrow a = 1$</p> <p>M: $b = 0$</p> <p>T: $-c - 2 = 0 \Rightarrow C = -2$</p> $\pi_4 = \left(\frac{h * g}{v^2}\right) = \frac{\sqrt{h * g}}{v} = \frac{v}{\sqrt{h * g}} = Fr \text{ (N}^\circ \text{ de Froude)}$
$\pi_5 = h^{a5} * \rho^{b5} * v^{c5} * \tau$ $\pi_5 = L^{1a} * L^{-3b} * M^{1b} * L^{1c} * T^{-1c} * L^{-1} * M^1 * T^{-2}$ <p>L: $a - 3b + c - 1 = 0 \Rightarrow a = 0$</p> <p>M: $b + 1 = 0 \Rightarrow b = -1$</p> <p>T: $-c - 2 = 0 \Rightarrow c = -2$</p> $\pi_5 = \left(\frac{\tau}{\rho * v^2}\right) = C_f \text{ (Coeficiente fricción adimensional)}$

2.3. Número de Froude

Como nuestro caso lo que nos interesa estudiar son casos de superficie libre cuya principal fuerza es la de gravedad el número adimensional relevante para nuestro estudio es el número de Froude por lo que lo definiremos a continuación:

Número de Froude:
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Este número es significativo para flujos con superficie libre, es una razón entre la fuerza inercial y la gravitacional. A mayor número de Froude, mayor fuerza inercial. Es útil en el estudio de saltos hidráulicos como los que ocurren en la sucesión rápido pozón.

Para el número de Froude,
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * \frac{A}{T}}}$$

Donde, v : representa la velocidad en la sección del canal.

g : es la aceleración de gravedad, asumida como 9.8 m/s.

A : es el área mojada.

T : es el ancho superficie libre.

Donde sea, $Fr < 1$: régimen del flujo será subcrítico, para $Fr = 1$: régimen del flujo será crítico y para $Fr > 1$: régimen del flujo será supercrítico.

Además se estudio el número de Reynolds de manera de caracterizar el tipo de flujo presente.

Y el número de Reynolds se obtuvo de la siguiente forma:

$$Re = \frac{4 * Rh * V}{\nu}$$

Donde: Rh : Radio hidráulico.

V : Velocidad del flujo.

ν : Viscosidad cinemática del agua.

Como criterio se utilizaran:

$Re < 500$: Flujo Laminar, $500 < Re < 2000$: Flujo Transición, $Re > 2000$: Flujo Turbulento.

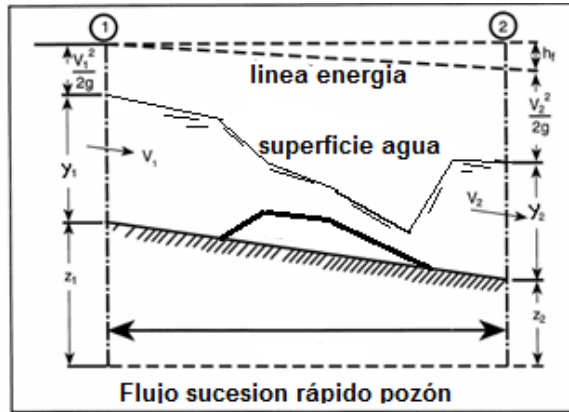
2.4. Pérdidas de energía

Se calcularon las pérdidas de energía presentes en el sistema por tramo y un total para cada caudal estudiado. Para calcular las pérdidas de energía se utilizaron diferentes métodos según la sección del canal, para secciones de pendiente suave se utilizo el principio de conservación de energía mediante la siguiente expresión:

$$hf = y_1 + z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} - y_2 - z_2 - \frac{v_2^2}{2 * g}$$

En la Figura N°3 se presenta un esquema indicando a que corresponde cada valor en la sucesión rápido pozón.

Figura N° 3 Esquema conservación de energía en canales (Ven Te Chow, 1994)



Las pérdidas de energía en el resalto hidráulico se calculan mediante el principio de conservación de cantidad de movimiento para el canal de laboratorio:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 * y_1 * y_2}$$

3. METODOLOGIA

Para cumplir con el objetivo general propuesto se utilizaron 3 metodologías, donde cada una de ellas fue empleada para un objetivo específico.

3.1 Caracterización Geométrica e Hidráulica de los ríos de la región del Bío Bío.

3.1.1 Estimar los parámetros geométricos de los ríos de la región del Bío Bío.

- Se determinaron los parámetros geométricos: Ancho, Ancho inundación, Largo del tramo, Pendiente local rápido, Pendiente local pozón y Distancias entre sucesión rápido-pozón. Mediante el uso de fotografías aéreas obtenidas del software Google Earth con la ayuda de sus herramientas de regla y ruta. Howard H. Chang. (1988) definió que un largo de estudio correcto para un río está estimado por la siguiente relación:

$$L=2*\pi*Bi$$

Donde: L= Largo a estudiar
Bi= Ancho de inundación

- Se utilizaron los ríos Laja, Duqueco, Bureo, Itata y Cato. De un universo de los 18 ríos más relevantes en la región del Bío Bío debido a que presentan condiciones similares en sus caudales.
- Utilizando esta relación y las fotografías aéreas, mediante la herramienta regla proporcionada por Google Earth se determinaron los anchos de inundación de los 5 ríos seleccionados para luego obtener el largo de estudio requerido.
- Una vez establecido el largo de estudio requerido se trazo una ruta a través de cada río seleccionado para delimitar la zona de estudio tal como se muestra en la Figura N°4.



Figura N° 4 Fotografía aérea sucesión rápido-pozón

- Mediante la herramienta regla y línea se midió las distancias entre rápidos (o zonas de pozón), los largos de cada rápido y el ancho.
- Para obtener las pendientes se utilizo la herramienta mostrar perfil de elevación que está disponible una vez trazada una ruta, con esta se pueden observar las cotas de terreno o directamente las pendientes en las zonas de rápido como en las de pozón tal como se muestra en la Figura N°5.

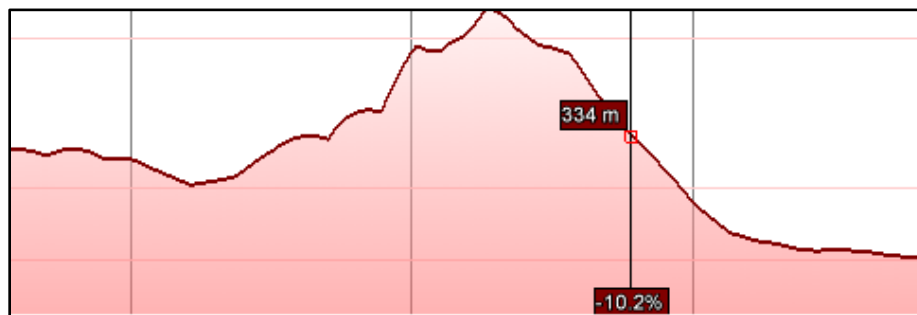


Figura N° 5 Perfil de elevación.

3.1.2 Estimar los parámetros de hidráulicos de los ríos de la región del Bío Bío.

- Para obtener los caudales en los ríos de la región seleccionados se utilizaron los proyectos de título desarrollados por Sánchez (2009) y Sepúlveda (2008), de los cuales se utilizaron los caudales máximos instantáneos asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años además de su caudales medio mensuales de cada uno de los ríos seleccionados.
- Para los valores de rugosidad se utilizaron los valores propuestos por S.M.Woodward - C. J Posey (1949) incluidos en el anexo A.
- Una vez obtenidos valores de cada parámetro tanto geométrico (Ancho, Largo del tramo, Pendiente local rápido, Pendiente local pozón y Distancias entre sucesión rápido-pozón) como hidráulico (rugosidad, caudales) para cada río se ordenaron en tablas en las cuales se obtuvieron los promedios para cada uno de estos parámetros.
- Una vez obtenidos los parámetros promedio de los 5 ríos estudiados se procedió a promediar sus resultados con tal de obtener 1 solo río promedio con las características de todos estos el cual se le nombrara desde ahora como río promedio.
- Los resultados completos se adjuntan en Anexo A.
- Los demás parámetros como altura de escurrimiento será obtenida directamente de los ensayos de laboratorio, la velocidad del flujo será obtenida mediante la ecuación de continuidad al conocer las alturas de escurrimiento, perdidas de carga serán obtenidas una vez se conozcan las alturas de escurrimiento al igual que el número de Froude.

3.2. Implementar un modelo físico a escala reducida de la sucesión rápido-pozón representativo de ríos de la región del Bío Bío.

Para poder afrontar el estudio de los modelos reducidos se realizo un análisis dimensional. Este permite reducir el número de variables intervinientes en un problema y expresar el resto en función de las consideradas como fundamentales.

Se determinara el comportamiento predominante en el fluido. Sobre este comportamiento se elegirá la semejanza de escalas más adecuada para la representación del modelo. Esta semejanza se establece a través del monomio adimensional predominante. Finalmente, se evaluara la influencia asociada a la adopción de esta simplificación antes de proceder a la propuesta y construcción del modelo.

Como el problema a estudiar las fuerzas predominantes son las gravitatorias el número adimensional predominante es el número de Froude y se propondrá un modelo basado en el lecho tipo D mostrado en la Figura N°2 utilizando los parámetros obtenidos en la metodología 3.1 una vez aplicada la escala correspondiente que permita maximizar el uso del canal de laboratorio.

3.2.1. Selección de Escala.

- Una vez obtenidas las relaciones de escala para reproducir correctamente el modelo se procedió a seleccionar la escala a utilizar, para ello se maximizo el uso de la geometría del canal utilizando una razón que relacione el ancho del rio promedio con el ancho del canal de laboratorio dada por:

$$\text{Factor de escala} = \text{Ancho del rio promedio} / \text{Ancho del canal}$$

El cual permitió determinar que para aprovechar al máximo la geometría del canal la escala requerida para el prototipo seria de 1:200 (factor de escala 200), este procedimiento se puede observar en el Anexo B.

3.2.2. Modelo y Semejanza Hidráulica

Modelo Hidráulico:

Es la representación física a escala reducida de un fenómeno físico o prototipo, que no solo reproduce la forma y volumen, sino que además su comportamiento frente a los procesos que intervienen en este caso se pretende representar la sucesión rápido-pozón para los ríos de la región del Bío Bío.

Semejanza de Froude

Se utiliza cuando tenemos problemas con superficie libre donde las fuerzas predominantes son las gravitatorias. Como ejemplos pueden tenerse los canales, resaltos.

En la Tabla N° 2 se muestran las relaciones de escala que fueron utilizadas para cada parámetro geométrico como hidráulico utilizando la semejanza de Froude.

Se utilizaron algunas consideraciones como que la gravedad y el fluido son los mismos en el prototipo y modelo, el procedimiento como se llegó a estos resultados se adjunta en el anexo B.

Tabla N° 2 Relación de escalas para los parámetros geométricos e hidráulicos.

Relación de Distancias	$\lambda = \frac{L}{L_0}$
Relación de Froude	$F^2 = \frac{v^2}{g * L} = \frac{v^2}{g_0 * L_0} = \text{cte.}$
Relación de Gravedad	$\frac{g}{g_0} = 1$
Relación de Velocidad	$\frac{v}{v_0} = \sqrt{\lambda}$
Relación de Tiempo	$\frac{t}{t_0} = \sqrt{\lambda}$
Relación de Caudales	$\frac{Q}{Q_0} = \sqrt{\lambda^5}$
Relación de Rugosidad	$\frac{n}{n_0} = \lambda^{\frac{1}{6}}$

- Una vez se tiene el factor de escala a utilizar se procedió a llevar a escala los parámetros geométricos del río prototipo los cuales se presentan en la Tabla N°3:

Tabla N° 3 Parámetros geométricos río promedio vs canal en escala 1:200

	Río Promedio	Canal
Ancho (m)	96	0.48
Largo (m)	2400	12
Largo rápido (m)	60	0.3
Largo pozón (m)	160	0.8
Rugosidad	0.035	0.014
Pendiente pozón (%)	0.3	0.3
Pendiente rápido (%)	9.4	9.4

- Para obtener los caudales que se utilizaron en los ensayos fue necesario determinar la capacidad de flujo que puede entregar el canal de laboratorio para ello cabe consignar que el canal cuenta con un sistema de abastecimiento de 4 bombas y una llave manual para regular el caudal circulante. A continuación la Tabla N°4 muestra los caudales que entrega cada sistema:

Tabla N° 4 Caudales entregados por las bombas y llave de laboratorio

Nombre	Caudal (Lts/s)
Llave	1.3
Bomba 1	4
Bomba 2	1.25
Bomba 3	1.53
Bomba 4	0.75

- Debido a la limitación de caudales que se pueden generar en el canal de laboratorio los caudales promedios calculados en el Anexo A no pueden obtenerse. Sin embargo si pueden generarse los caudales del río Laja mediante cada bomba o llave para los caudales más pequeños, mientras que para caudales

más altos se pueden obtener mediante combinaciones de bombas y llave. En la Tabla N°5 se entregan los valores de caudales que se ensayaron:

Tabla N° 5 Caudales a escala que se ensayaron.

Periodos de retorno	Caudal Base	T<2	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100	T>100
Caudales (m ³ /s)	227	345	865	1411	1823	2253	2397	2859	3351	4243
Caudales (Lt/s)	0.40	0.61	1.53	2.49	3.22	3.98	4.24	5.05	5.92	7.50

Donde T: Periodo de retorno.

- Para seleccionar la forma del lecho que se construyo en laboratorio se utilizo el lecho tipo D que se presenta en la Figura N°2:
- Finalmente se entrego un diseño del canal propuesto, el diseño se presenta a continuación en la Figura N°6 y Figura N°7 donde se aprecian el sistema de medición compuesto por reglas de medición, sensores de distancia, sensores de temperatura de agua y aire, aforador volumétrico, vertedor.:

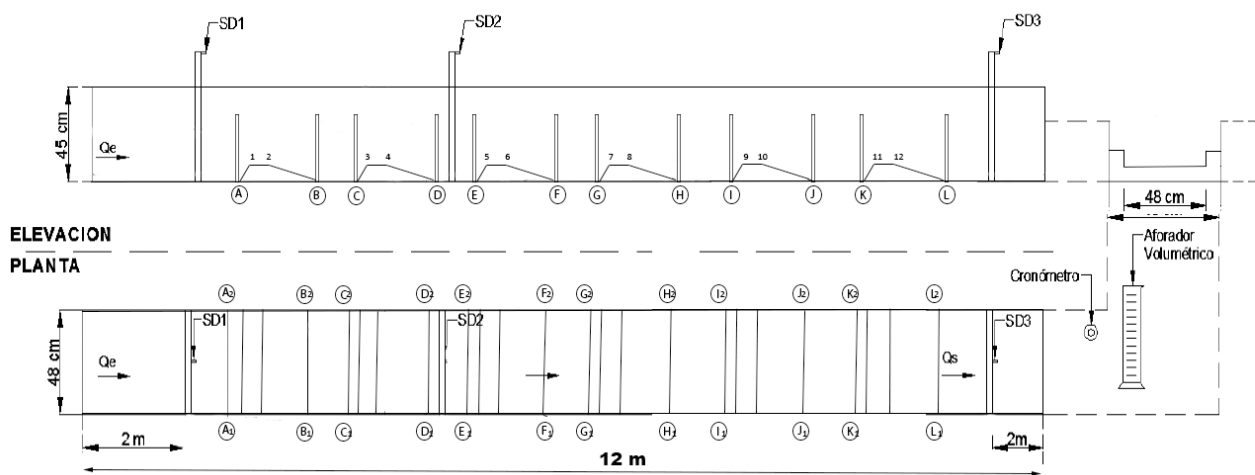


Figura N° 6 Esquema del canal de laboratorio.

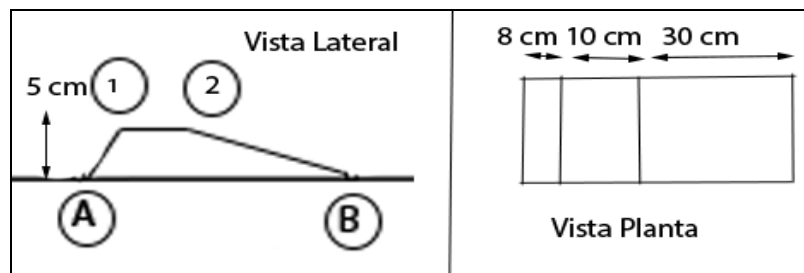


Figura N° 7 del rápido construido en el canal.

3.2.4. Componentes del sistema de medición y variables a medir.

- **Nivel de agua:** Se determina como la cota de agua sin corrección más la corrección a la cota de agua, cuyos valores se indicaron en la Tabla N°5.
- **Reglas de medición:** se utilizaron 24 reglas con precisión de 1 mm, estas fueron ubicadas 12 en cada pared lateral del canal paralelas entre sí, se encuentran posicionadas al comienzo y al final de cada rápido tal como se muestra en las Figuras 3 y 4. Se les nombra con las letras desde la A hasta la L según su posición (desde aguas arriba hasta aguas abajo respectivamente), además se acompañan con los sufijos 1 y 2 para identificar las mediciones de cada lado mientras que el punto central será llamado simplemente con la letra correspondiente. Estas reglas miden la cota de agua. De modo de garantizar la precisión entre ellas se realizó un procedimiento de calibración el cual se menciona a continuación:

Debido a que el canal presenta una curvatura longitudinalmente principalmente en el centro para dejar el canal con una pendiente 0° u nula se fija a una altura de 11 cm (en la manilla ubicada aguas abajo del canal) con esto se procede a realizar la ubicación y calibración de las reglas de medición manual que poseen una precisión de ± 1 mm, para ello se ubica una de las reglas al comienzo del canal y se procede a llenar el canal cabe destacar que dicho procedimiento se realiza con un vertedor cerrado aguas debajo del canal, el canal se llena hasta una altura determinada en este caso 185 mm indicados en la primera regla instalada y ubican las demás reglas en los puntos señalados en la Figura N°5 (desde la A hasta la L) en ambos lados del

canal de modo tal que cada una de las 24 reglas instaladas indiquen la misma cota de agua en este caso 185 mm. Luego se probaron diferentes niveles de agua tanto mayores como menores con lo cual se obtienen las mismas alturas en todas las reglas instaladas.

Cuando esto sucede ya se posee un sistema de medición uniforme a lo largo del canal, sin embargo debido a que el canal presenta una pendiente lateral las diferencias entre cada costado del canal hacen inexactos las alturas medidas por las cotas de agua, es por esto que se necesita calibrar y corregir estas cotas de forma de obtener la altura de agua real en el centro del canal en cada punto de control instalado desde A hasta L. Para ello se utiliza una regla metálica que parte desde 0 en su extremo y se procede a calcular la diferencia que existe respecto al fondo del canal entre cada regla instalada, Debido a que tenemos dos reglas instaladas por cada punto es que podemos obtener el promedio de las diferencias de altura en cada punto y con aquella diferencia al sumarla a la cota de agua podremos obtener la altura de agua real al centro del canal.

Debido a que los rápidos fueron construidos de forma tal que las alturas a ambos costados sean iguales no requieren de esta corrección.

A continuación se presentan dichas correcciones que nos permitirán obtener las alturas de agua o nivel de escurrimiento presente en el centro del canal.

Tabla N° 6 Correcciones de altura para cada regla de medición.

Lado Pizarra	mm	Lado Mesón Carpintería	mm	punto central	mm
A1=	5	A2=	-4	A=	0.5
B1=	1	B2=	-4	B=	-1.5
C1=	-1	C2=	-5	C=	-3
D1=	-3	D2=	-6	D=	-4.5
E1=	-3	E2=	-7	E=	-5
F1=	-4	F2=	-3	F=	-3.5
G1=	2	G2=	-4	G=	-1
H1=	2	H2=	-3	H=	-0.5
I1=	6	I2=	-4	I=	1
J1=	6	J2=	-3	J=	1.5
K1=	-2	K2=	-6	K=	-4
L1=	3	L2=	-4	L=	-0.5

Una vez calibrado el sistema de medición manual del canal, se procede a ubicarlo a la pendiente correspondiente, dado que la pendiente nula se encuentra a una diferencia de altura de 11 cm del canal y la pendiente de la zona en régimen lento del modelo se produce con una pendiente de 0.3% se ubica el canal a una diferencia de altura de 14 cm indicados en la manilla de regulación de altura ubicada aguas abajo del canal.

- Sensores de distancia:** Se utilizaron 3 sensores de distancia (SD1, SD2 y SD3), como muestra la figura N° 5, que están ubicados antes del punto A, antes del punto E y antes del vertedor rectangular a la salida del canal. Estos son ultrasónicos de modelo PING))TM #28015 con un nivel de medición de 0.02 a 3 metros y una precisión menor a 0.2 milímetros. Dichos sensores se conectan a un micro controlador modelo Mega 2560 y éste a su vez se conecta a un computador a través del puerto serial USB. Las mediciones pueden ser vistas en tiempo real mediante el Software Arduino, a través del programa correcto adjunto en el Anexo D.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) se emplearon para cada sensor con el fin de estimar el nivel de agua o escurrimiento. Estas fueron obtenidas a través de la calibración de estos sensores realizados en laboratorio según protocolo definido en el Anexo D.

$$\text{Sensor 1: } y = \frac{(695.48-x)}{0.9842} \quad R^2= 1 \quad (1)$$

$$\text{Sensor 2: } y = \frac{(686.58-x)}{1.001} \quad R^2= 1 \quad (2)$$

$$\text{Sensor 3: } y = \frac{(754.51-x)}{0.9841} \quad R^2= 0.999 \quad (3)$$

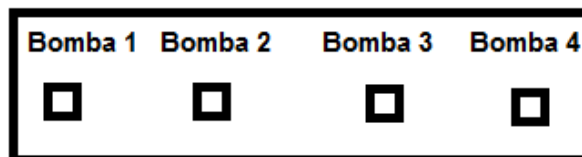
Donde x es la altura observada en (mV) con un error estimado menor a 0.05 mV, e y es la altura de escurrimiento en (mm).

- **Bombas y llave de agua:** Se utilizaron 4 bombas para generar los caudales necesarios, además de una llave de paso manual para generar caudales más pequeños o combinación de caudales. Las bombas entregan valores fijos de caudal, mientras que la llave de agua permite generar un rango de caudales estos fueron mostrados en la Tabla N°3 anteriormente y se adjuntan a continuación nuevamente:

Nombre	Caudal (Lts/s)
Llave	Desde 0 a 1.3
Bomba 1	4
Bomba 2	1.25
Bomba 3	1.53
Bomba 4	0.75

Estas se controlan a través de un tablero de activación de bombas y para identificar fácilmente a cual interruptor corresponde cada bomba se muestra a continuación un esquema del tablero de control señalando a que bomba corresponde cada interruptor.

Figura N° 10 Tablero de interruptores de bombas



- **Videos y fotografías:** Se utilizó la cámara fotográfica de 8 Megapíxeles de un teléfono celular Samsung Galaxy Note II, en donde los archivos se guardaron en formato JPG y video en formato MP4 en una resolución HD (720p) al finalizar la toma de datos de cada ensayo principalmente como registro debido a que las variaciones son milimétricas en las alturas a lo largo del canal los registros no muestran diferencias apreciables.
- **Vertedor:** Se construyó un vertedor rectangular de madera sellada con cinta aislante y goma EVA (Etilvinilacetato) para evitar filtraciones en la unión del vertedor y canal, posee una altura de 5 cm con precisión de 1 mm igual a la de los rápidos construidos.
La ecuación (4) muestra la ecuación de calibración del vertedor, según protocolo definido en el Anexo D.

$$Q = 4523h^2 - 6309h + 2200 \quad R^2 = 0.996 \quad (4)$$

Donde h es el registro entregado por el sensor tres (SD3) en (mm) y Q es el caudal medido por la curva de descarga en (l/s).

- **Aforador volumétrico y cronómetro:** Se utilizó un aforador de volumen conocido con una precisión menor a los 10 ml para los caudales más pequeños y un aforador de menor precisión para los caudales más grandes el cual permite medir volúmenes de 60 y 120 litros y un cronómetro con un error menor a 16 centésimas de segundo, con los cuales se midió el tiempo de llenado y el volumen utilizado con los cuales se determinó el caudal de salida del canal durante los ensayos.
- **Calibre:** También conocido como pie de metro o pie de rey se utilizó para medir altura de agua en los puntos superiores del rápido señalados con números en la figura 4, este instrumento posee precisión de 1 milímetro.

3.2.5. Tratamiento de la información.

Para estudiar la sucesión rápido-pozón se calcularan sus números de Froude y Reynolds en cada tramo de tal manera de caracterizar el tipo de flujo presente en el sistema, además se calcularon las pérdidas de cargas en el sistema producidas por el sistema.

Resultados de ensayos: Se presentan a través de un gráfico en la que se muestran una comparación de alturas medidas vs calculadas, además se entrega una tabla con los resultados de las pérdidas de energía en cada tramo de cambios en las características del flujo.

Análisis de caudal y nivel de agua: Con los registros de nivel de agua y los caudales respectivos a cada nivel de agua de los ensayos, debido al principio de continuidad es posible obtener el perímetro mojado y área mojada en cada sección dado que el ancho en el canal es constante y nos permite obtener las velocidades del flujo en cada sección con lo cual logra calcular los números de Reynolds y Froude, además de las pérdidas de energía producidas.

3.2.6. Ensayos experimentales

Los ensayos experimentales fueron realizados para la obtención de los ejes hidráulicos para 10 caudales diferentes (227, 345, 865, 1411, 1823, 2253, 2397, 2859, 3351 y 4243 m³/s.).

Al canal se le dio la pendiente general de los tramos en pozón indicada anteriormente, mientras que los rápidos construidos le entregaban la pendiente de las zonas de rápidos.

Se realizó un estudio de intervalos de confianza mediante el método de t-student mediante el cual se determinó si cada altura medida estaba dentro de los intervalos al comprobarse que se cumplía dicha condición para todos los intervalos, se adoptó una sucesión rápido-pozón como representativa y se realizaron los procedimientos utilizando solo dicha sucesión rápido-pozón representativa.

Además se realizó un modelo del canal construido en el software HEC-RAS en tamaño real y los ejes hidráulicos calculados fueron llevados a escala y comparados mediante un gráfico de alturas medidas vs alturas calculadas, en el cual se traza una línea de pendiente 45° con la que se observa la similitud en los resultados obtenidos mediante medición y cálculo.

3.2.6.1. Protocolo de los ensayos

Para la obtención de los ejes hidráulicos para los 10 caudales estudiados (227, 345, 865, 1411, 1823, 2253, 2397, 2859, 3351 y 4243 m³/s.) se utilizaron además de las reglas de medición manual, los sensores de distancia instalados en el canal, es importante señalar que para la obtención de estas se conectan las señales de salida de los sensores a una placa Arduino y ésta se comunica a un computador donde las mediciones son observadas en tiempo real, luego son registradas y guardadas como datos para su posterior estudio. El código Arduino empleado para registrar las mediciones de sensores y vertedor rectangular se encuentran adjuntos en el Anexo D.

El programa entrega registros de tiempo, temperatura ambiente y de agua, nivel de escurrimiento de agua (donde se ubican los sensores) y caudal. Estas mediciones se agregan a las mediciones obtenidas a través de las reglas de medición, el conjunto de estas alturas conforman los ejes hidráulicos del modelo.

A continuación se muestra el protocolo seguido para la realización de los ensayos.

- Conectar el equipo de medición (Placa Arduino) al computador
- Encender el equipo de medición y ver que los sensores entreguen valores correctos.
- Abrir la llave de paso del agua o activar bombas según sea el caso, si se requiere un caudal creado a partir de la combinación de bombas y llave (caudal regulable de 0 a 1.2 litros/s) se activan todas las necesarias. A continuación la Tabla N°7 nos muestran como generar los caudales ensayados.

Tabla N° 7 Como generar los caudales ensayados.

Caudal Real (m ³ /s)	Caudal a Escala (litros/s)	Como generarlo (litros/s)
227	0.40	Llave
345	0.61	Llave u Bomba 4
865	1.52	Bomba 3
1411	2.50	Bomba 3 + Llave
1823	3.20	Bomba 3 + Bomba 4 Llave
2253	3.90	Bomba 2 + Bomba 3 + Llave
2397	4.00	Bomba 1
2859	5.00	Bomba 1 + Llave
3351	5.90	Bomba 1 + Bomba 2 + Llave
4243	7.50	Bomba 1 + Bomba 2 + Bomba 3 + Bomba 4 + Llave

- Esperar 10 minutos a que se estabilice el caudal, mientras ir verificando que los sensores funcionen correctamente con estos nuevos caudales.
- Hacer aforos a los 5 minutos de abierta la llave o encendidas las bombas y a los 10 minutos de modo de verificar si el caudal se encuentra constante.
- Volver a abrir la ventana de medición Arduino de tal modo que los datos registrados sean en estado permanente.
- Tomar la lectura de cada regla (de A hasta L), como las lecturas en ambos lados son idénticas se puede realizar desde cualquiera de los dos lados, para mantener una metodología se leerán todas desde la misma zona (en el sentido que se aprecia en la Figura 3).
- Luego se procede a medir mediante el calibrador la altura de agua en los puntos superiores de los rápidos (denominados con números en la figura 4 desde el 1 hasta el 12) desde aguas arriba hasta aguas abajo respectivamente.

- Una vez tomados todos los datos, se procede a realizar un aforo nuevamente para verificar que el caudal no ha sufrido variaciones mientras se tomaban los datos.
- Se guarda el registro de los sensores en un archivo de texto (.txt) y se cierra el programa.
- Se toma fotografías u otro material multimedia.
- Se repite procedimiento para cada uno de los 10 caudales ensayados.
- Una vez finalizado, se procede a cerrar la válvula de paso de agua u apagar las bombas según sea el caso, se desconecta el equipo de medición del computador.
- Se cubren los sensores para protegerlos del polvo o agua.
- Se elimina el agua del canal, se retira el vertedor y se procede a la limpieza del canal para eliminar toda el agua presente.
- Finalmente se desmontan los rápidos construidos en el canal y se procede a limpiar el canal de laboratorio.

3.3. Evaluar las características geométricas e hidráulicas de la sucesión rápido-pozón construida de los ríos de la región del Bío Bío a escala reducida con lecho fijo.

3.3.1. Software a modelación hidráulica.

Para comparar los ejes hidráulicos medidos mediante los ensayos de laboratorio se calcularán los ejes hidráulicos para los mismos caudales y modelo construido en tamaño real mediante el software HEC-RAS versión 3.1.

2.3.2. Sistema de unidades

El programa se trabaja en el sistema internacional (sistema métrico). Por lo que todos los resultados serán entregados en este formato.

3.3.3. Sección transversal y perfil longitudinal del terreno.

Se simuló en tamaño real (1:1) el mismo modelo construido a escala en el canal, primero ingresaron sus datos geométricos en la opción del HEC-RAS “geometric data” en el cual se realizó un trazado del modelo, luego se crearon sus perfiles transversales (en cada punto donde se tomaron mediciones) mediante la opción “cross section” donde, además de su

geometría se ingresaron las rugosidades tanto de las paredes como del fondo del canal especificadas en la Tabla N°2.

Además se interpolaron las secciones de manera de generar mayor cantidad de perfiles transversales de manera de aumentar la precisión de cálculo del software, esto se hizo mediante la opción “xs interpolation” donde se generaron secciones cada 0.1 m.

3.3.4. Datos Hidráulicos de flujo en régimen permanente.

Se ingresaron los datos para flujo de régimen permanente en el software en la opción “steady flow data”, se indicó el número de perfiles que se calcularan en este caso fueron 10 (para cada uno de los caudales indicados en la Tabla 4). El programa considera que el caudal en las secciones no cambia a menos que se lo indiquemos introduciendo el caudal en una determinada sección, para nuestro estudio el caudal es el mismo debido al principio de continuidad por lo que ahora es necesario ingresar las condiciones de borde para cada uno de los perfiles en la opción “reach boundary conditions”.

3.3.5. Condiciones de Borde o Contorno.

Se ingresan las condiciones de contorno, el software permite ingresar 4 tipos de condiciones de borde: Nivel de agua conocido, Calado o Altura crítica, Altura normal, curva de gasto.

En nuestro caso utilizamos altura crítica, tanto aguas abajo (en el vertedor) como aguas arriba.

3.3.6. Ejecutar simulación

Para simular se utiliza la opción “steady flow analysis”, antes de simular mediante la opción “set calculation tolerances” se establecieron el máximo número de iteraciones en 40 (el máximo del programa). Para realizar la simulación se nos pide ingresar el régimen de flujo que se espera encontrar, se utilizó régimen mixto (esta opción requiere condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo). Con esto se obtuvieron los ejes hidráulicos en escala real.

3.3.7. Comparación de ejes hidráulicos.

Se llevan a escala 1:200 los resultados entregados por el HEC-RAS para comparar con los resultados obtenidos en el modelo a escala. A continuación se utilizó un gráfico de dispersión graficando “Alturas de agua medidas vs alturas de agua calculadas”, se trazó una recta en el gráfico desde el punto (0,0) al punto (100,100) generando una pendiente de 45°, lo que permitirá observar las diferencias entre las alturas de agua medidas y las alturas de agua calculadas.

3.3.8. Intervalos de confianza

Una vez obtenidas las alturas de escurrimiento, se realizó un análisis de intervalos de confianza mediante el método de t-student de manera de presentar una sucesión rápida tipo para ello se calcularon los intervalos de confianza con un coeficiente de confianza de 95% para el total de rápidos construidos en este caso 6 para cual se obtuvo un parámetro $\alpha=1.943$, la desviación estándar de los datos obtenidos, el promedio y el número de datos. Utilizando la siguiente fórmula:

$$I = [X \pm \alpha * \sigma / \sqrt{n}]$$

Donde: x = promedio; α = coeficiente de confianza; σ = desviación estándar;

n = número de datos.

3.3.9. Números de Froude y Reynolds.

Se calcularon los números de Froude y Reynolds de tal manera de caracterizar el flujo en cada tramo:

Una vez obtenidos los números de Froude y Reynolds se procedió a graficarlos de modo de caracterizarlos por cuadrantes según el tipo de flujo presente: Flujo subcrítico-laminar, Flujo supercrítico-laminar, Flujo subcrítico-turbulento, Flujo supercrítico-turbulento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos correspondientes a cada una de las metodologías planteadas en el capítulo 2.

4.1. Resumen Parámetros geométricos

En la Tabla N°7 se muestran los datos geométricos obtenidos para cada río estudiado y el río promedio de ellos, además se muestran los valores de desviación estándar y coeficiente de variación. En el Anexo A se incluyen los resultados de forma completa.

Tabla N° 8 Parámetros geométricos promedio.

	ancho inundable	ancho normal	Largo estudio	separacion R-P	largo rapido	pendiente %
rio laja	400	120	2500	154	69	0.3
duqueco	40	40	320	161	55	0.27
rio bureo	344	120	2160	153	63	0.33
rio itata	540	150	3400	150.8	72.8	0.31
rio cato	140	90	880	106.8	53.4	0.3
Río Promedio	292.8	104	1852	145.12	62.6	0.30
des. Est.	201.54	41.59	1245.28	21.76	8.42	0.02
C.V (%)	68.83	39.99	67.24	14.99	13.45	7.18

En la Tabla N°7 se aprecia que si bien los valores de los coeficiente de variación para las propiedades geométricas de los ríos como son el ancho inundable, ancho normal y largo de estudio presentan coeficientes de variación altos cercanos al 70% lo que indican que poseen una dispersión muy alta, los coeficientes de variación de la pendiente y parámetros geométricos de los rápidos presentan valores con coeficientes de variación muy pequeños menores al 15% lo que nos señala que no presentan gran dispersión de sus datos. Lo que indica que la sucesión rápido-pozón depende de una relación de parámetros y no solo de las características geométricas de los ríos.

4.2. Resumen Parámetros hidráulicos

A continuación en la Tabla N°9 se presentan los parámetros hidráulicos de los ríos estudiados así como su desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla N° 9 Parámetros hidráulicos para diferentes períodos de retorno en m³/s.

	Caudal Base	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
Río Laja	227	864.8	1411	1823	2253	2397	2859	3351
Río Duqueco	95.74	775.5	1060	1209	1332	1368	1471	1563
Río Bureo	67.4	474.3	644.3	756.8	864.7	898.9	1004	1109
Río Itata	69.87	478.6	714.9	871.3	1021	1168	1215	1361
Río Cato	77.16	647.5	896.5	1026	1134	1165	1255	1336
Río Promedio	107.434	648.14	945.34	1137.22	1320.94	1399.38	1560.8	1744
desv. est.	67.8	174.7	306.6	419.3	548.2	582.1	744.4	912.6
C.V (%)	63.1	27.0	32.4	36.9	41.5	41.6	47.7	52.3

Como se muestra en la Tabla N°9 los caudales presentan coeficientes de variación con valores altos lo que nos indica que poseen una alta dispersión con valores que varían desde 27% hasta un 63% de coeficiente de variación, debido a la gran variabilidad que poseen los parámetros hidráulicos y geométricos se estima que estos poseen una relación que al cumplirse provocan la aparición de la sucesión rápido-pozón en el río.

4.3. Resultados ensayos experimentales

En la Figura N°8 se muestra la sucesión rápido-pozón típica y sus respectivos intervalos de confianza para cada caudal ensayado.

Figura N° 8 Sucesión rápido-pozón representativa

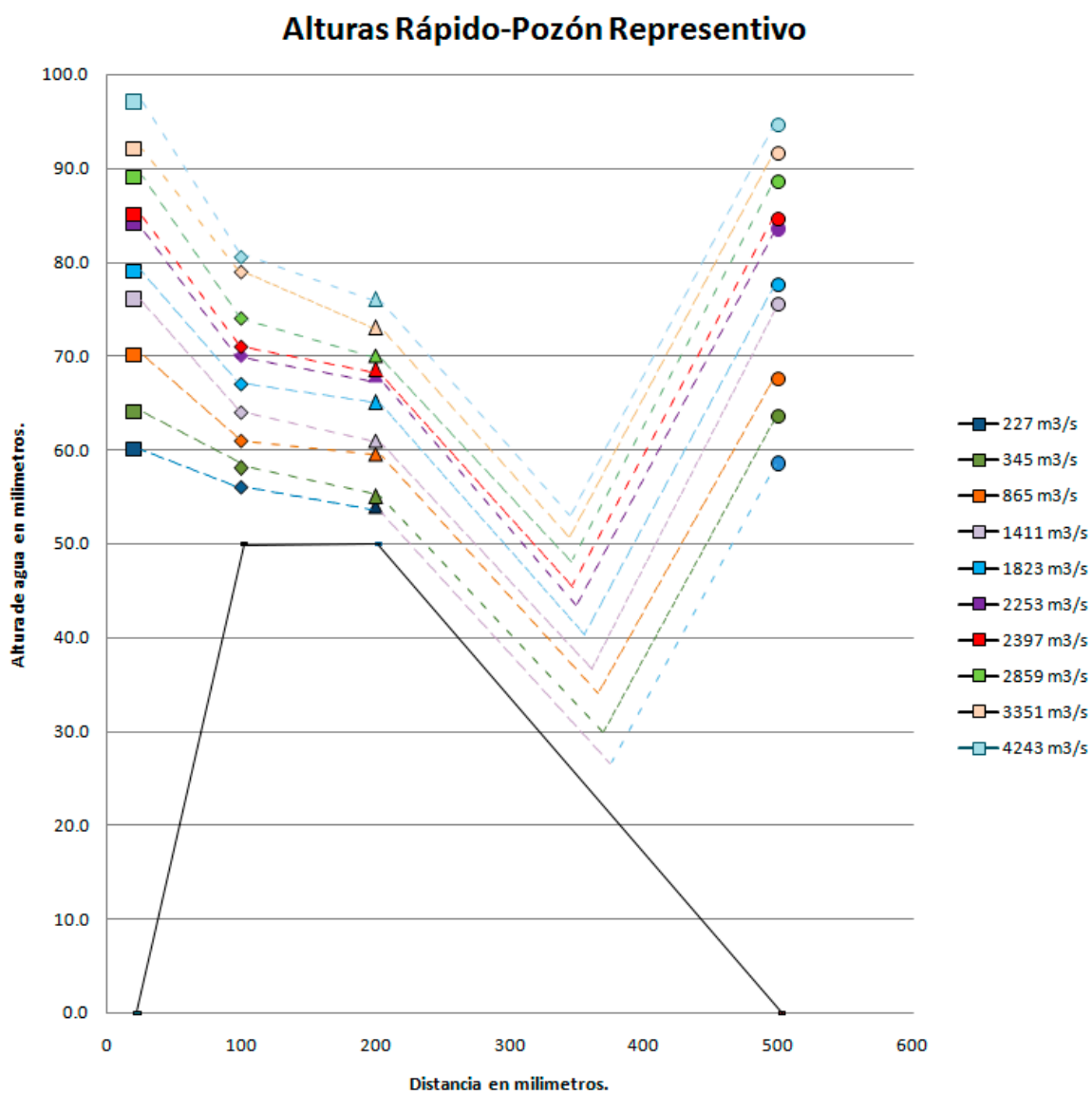


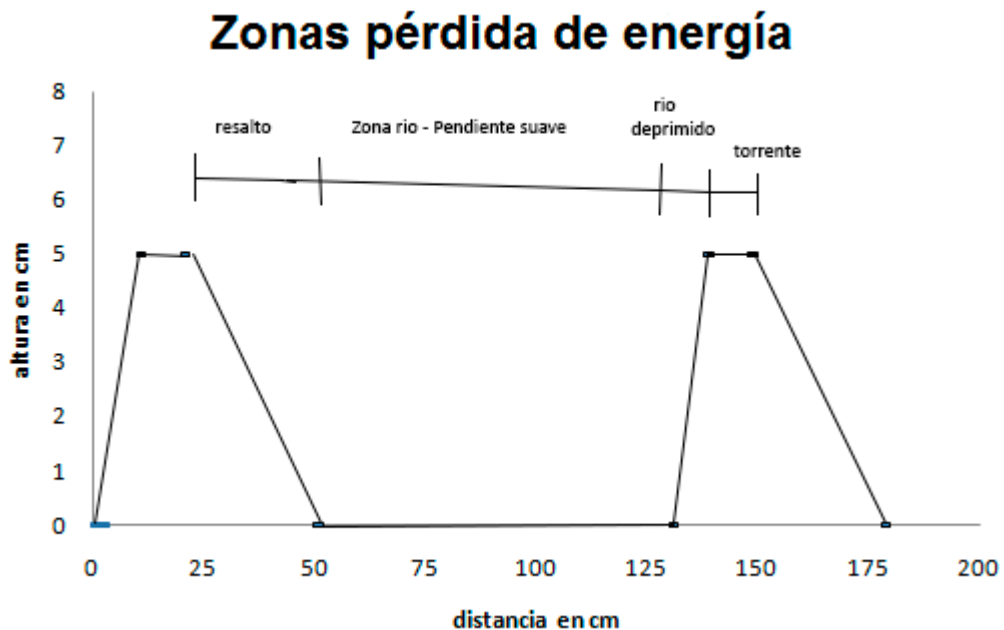
Tabla N° 10 Intervalos de confianza en mm

	227 m3/s	345 m3/s	865 m3/s	1411 m3/s	1823 m3/s	2253 m3/s	2397 m3/s	2859 m3/s	3351 m3/s	4243 m3/s
Intervalos	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
Cuadrado	61 - 58	66 - 61.2	72 - 69	78 - 74	80 - 79	84 - 82	85 - 82	90 - 87	92.5 - 91.6	97 - 95.8
Diamante	65 - 55	8.5 - 7.0	12.1 - 10.9	14 - 12.8	19 - 16	20-19	21.5 - 20.5	24 -24	28-28	30.5 - 30
Triangulo	4-0 - 4-0	5.0 - 5.0	10 - 9.0	11.4 - 10	15.3 - 14.5	18 - 16.5	18.5 - 17.5	21.4 - 20	23.7 - 22	26-26
Circulo	59.9 - 57.2	63.5 - 59.4	70.6 - 66.3	77.5 - 72.5	79.5 - 75.3	83.5 - 79.5	84.5 - 80.5	88.5 - 84.5	92.2 - 89.5	94.5-94.5

Debido a que cada altura medida para cada sucesión rápido-pozón construida se encuentra dentro de los intervalos de confianza se puede indicar que la figura N°10 representa una sucesión rápido-pozón típica con sus respectivas alturas de escurrimiento para cada caudal ensayado.

En la Figura N°9 se muestran las zonas de pérdidas de energía características de una sucesión rápido-pozón típica además se adjuntan los porcentajes de perdida asociados a cada zona.

Figura N° 9 Zona de pérdidas de energía



En la tabla N°11 se muestran los porcentajes de perdida respecto a la energía total.

Se calcularon las pérdidas de energía presentes en cada tramo de tal forma de identificar las pérdidas producidas por la sucesión rápido-pozón en el modelo.

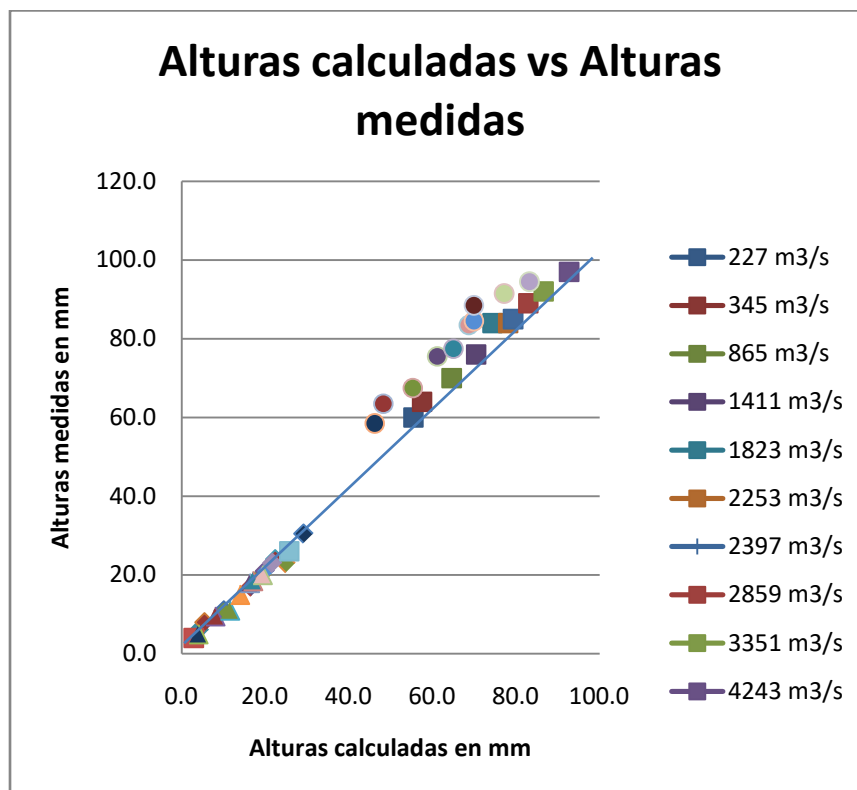
Tabla N° 11 Porcentaje de pérdidas de energía por zonas de una sucesión rápido-pozón.

	227 m ³ /s	345 m ³ /s	865 m ³ /s	1411 m ³ /s	1823 m ³ /s	2253 m ³ /s	2397 m ³ /s	2859 m ³ /s	3351 m ³ /s	4243 m ³ /s
Porcentaje %	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
Resalto	1.41	1.17	0.60	0.59	0.32	0.30	0.24	0.23	0.22	0.16
Zona de río	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
río deprimido	0.4	0.4	0.37	0.31	0.3	0.26	0.22	0.2	0.2	0.15
torrente	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Las pérdidas en los tramos de pendiente suave están en torno al 0.02% las que se consideran despreciables y tienden a cero en estos tramos, mientras que las pérdidas debido a los escalones del rápido (río deprimido) presentan valores mayores sin embargo siguen siendo menores a las pérdidas producidas por el resalto hidráulico, las pérdidas más significativas se producen debido al resalto hidráulico producido en el tramo de pendiente fuerte sin embargo estas pérdidas se vuelven más pequeñas (menores a 1%) para caudales cercanos a los 1000 m³/s e insignificantes (menores a 0.5%) para caudales mayores a 1800 m³/s desde el cual las pérdidas de energía se vuelven valores similares.

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos del modelo a escala desarrollado en el canal de laboratorio de hidráulica y del modelo simulado en el software HEC-RAS. Dichos resultados son presentados en la Figura N°10 mediante un grafico de “Alturas medidas vs Alturas calculadas”.

Figura N° 10 Alturas medidas vs Alturas calculadas.

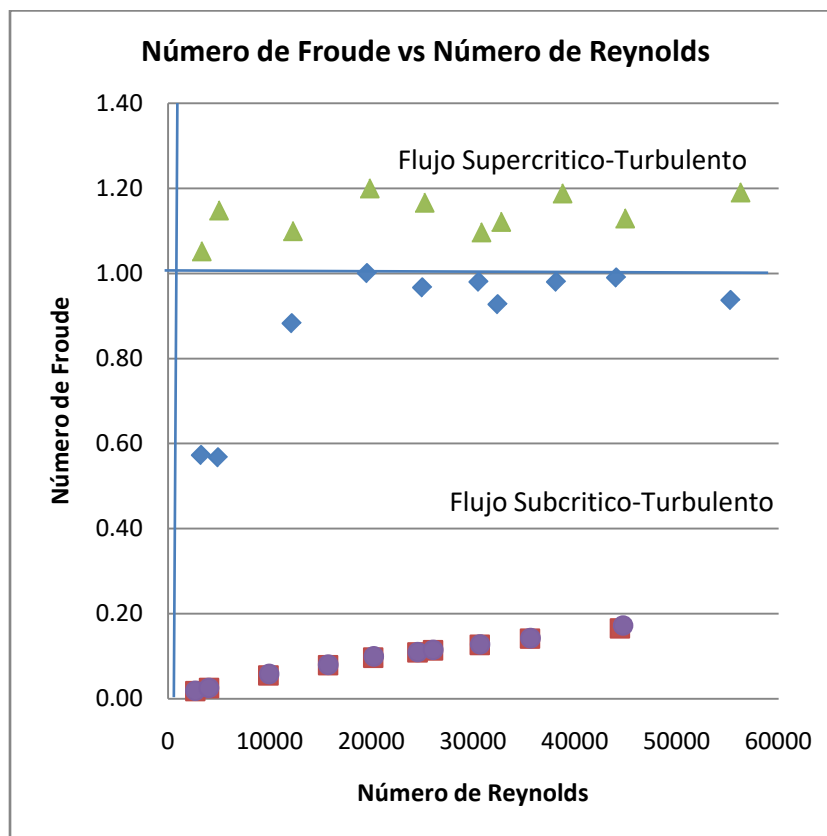


En la Figura N°10 se aprecian como las alturas medidas y calculadas presentan valores que se ajustan a la recta de 45° del grafico en todos los puntos excepto en los puntos ubicados exactamente después de la zona de resalto hidráulico, esto indica que el efecto del resalto hidráulico provoca cambios de altura que deben ser considerados al momento de estudiar la sucesión rápido pozón para todos los caudales estudiados. El resalto hidráulico produce variaciones de altura con respecto a las calculadas por el software Hec-Ras del orden del 10%.

4.4. Caracterización del tipo flujo

En la Figura N°11 se grafican los de números de Froude vs números de Reynolds calculados para las alturas de agua medidas en laboratorio, con el cual se observa el tipo de flujo presente en el sistema, las tablas con los números de Froude y Reynolds por cada punto de medición se entregan en el Anexo E.

Figura N° 11 Grafico Número de Froude vs Número de Reynolds.



Para el caudal más pequeño de 227 m³/s los números de Reynolds fueron alrededor de 2600 siendo los más bajos y para el caudal más alto de 4243 m³/s son alrededor de los 45.000 para zonas de pozón y cerca de 56 mil en las zonas de rápido según los criterios todos se encuentran en la zona de flujo turbulento tal y como ocurre en los ríos naturales, Además los números de Froude indicaron los valores de flujo subcrítico en las zonas de pozón y flujo súpercrítico en los rápidos, mientras que en las zonas del comienzo del escalón son cercanos a flujo crítico. En el Grafico se pueden observar las 2 combinaciones que existen en el modelo donde se encuentran tramos en donde el tipo de flujo es Subcrítico-Turbulento en las zonas de pozón y Flujo súpercrítico-Turbulento en las zonas de rápido.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Por último se realizan conclusiones de los resultados obtenidos:

- La aparición de la sucesión rápido-pozón no depende de que se cumplan cierto tipo de características geométricas ni hidráulicas sino de una interacción entre ambas es por ello que las características de la sucesión rápido-pozón presentan una dispersión tan baja a pesar de la gran variación que presentan las características geométricas y hidráulicas.
- El modelo construido y el modelo diseñado en software presentan alturas de agua similares para todas las zonas de la sucesión rápido-pozón típica excepto para la zona ubicada justo después del resalto hidráulico donde se producen diferencias cercanas al 10%, lo que indica que el efecto del resalto hidráulico es importante en el cálculo de alturas.
- Los números de Froude y Reynolds calculados para las alturas medidas indicaron que el modelo trabaja en condición de flujo subcrítico-turbulento para las zonas de pendiente suave y flujo súpercrítico-turbulento para las zonas de rápido tal y como ocurre en la realidad por lo que el modelo representa correctamente la semejanza hidráulica.
- Las pérdidas para caudales menores de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (crecidas máximas instantáneas de periodo de retorno menores a 5 años) presentan pérdidas de energía importantes debido principalmente a los resaltos hidráulicos que generan la mayor cantidad de pérdida con valores en torno al 1.4% hasta el 1% de la energía total del sistema, sin embargo para caudales mayores a $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ las pérdidas se vuelven pequeñas siendo estas menos a un 0.5% de la energía total.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda cambiar el material de construcción del canal de acrílico de 3mm por uno con mayor rugosidad como algún tipo de madera resistente al agua, tal como lo es el terciado marino el cual no se pudo utilizar en este proyecto de título debido a un tema de costos.

Se recomienda en futuros ensayos utilizar un aforador volumétrico de mayor precisión para caudales altos, esto debido a que el presente en el laboratorio solo permite utilizar 2 volúmenes de 60 y 120 litros con un sistema de medición poco preciso.

REFERENCIAS

1. Lisle, T. (1979). "A sorting mechanism for a riffle-pool sequence . Geological Society of America Bulletin", 1, 1-16.
2. Rodríguez, J., García, C., and García, M. (2002). "Mean Flow and Turbulence Characteristics in Pool-Riffle Structures. Hydraulic Measurements and Experimental Methods", 1-11.
3. Howard H. Chang. . (1988). Fluvial Processes in River Engineering. New York, New York, Estados Unidos: McGraw hill.
4. Santana O. Luis (en edición). Mecánica de Fluidos, apuntes Área Hidráulica DD98T-05 Capítulo IV ítem 3.
5. Martín V. Juan. (2009). Modelos físicos de ríos en lecho fijo y móvil. II Seminario de Potamología, 1, 12-35.
6. Sánchez, Pablo. (2009). *Análisis estadístico de caudales máximos y mínimos instantáneos en la región del Bío Bío*. Proyecto de título en conformidad para optar al título de ingeniero civil. Facultad de ingeniería, Universidad del Bío Bío, Concepción.
7. Sepúlveda, Eduardo. (2008). *Análisis estadístico de caudales en la región del Bío Bío*. Proyecto de título en conformidad para optar al título de ingeniero civil. Facultad de ingeniería, Universidad del Bío Bío, Concepción.

8. Nania L., y Molero E. (2007). Manual básico de Hec-Ras 3.1.3 y Hec-GeoRas 3.1.1. Granada, España.: Universidad de Granada.
9. Alonso, Raúl. (2009). Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña. En RÍOS DE MONTAÑA (1-5). Dpto. de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida: Cimbra.
10. Gracia S. Jesús, y Maza A. José. (2002). Morfología de los ríos. En Manual de ingeniería en ríos (Capítulo 11). Ciudad de México: Comisión Nacional de Agua, por el Instituto de Ingeniería. UNAM.
11. Ven te Chow. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Illinois, Estados Unidos: McGraw-Hill.

ANEXO A

Parámetros Geométricos e Hidráulicos

Los parámetros característicos de los ríos se dividen en 2 grandes grupos, los geométricos ya sea pendiente, longitud, ancho, etc. En otro grupo podemos agrupar los hidráulicos como caudales y rugosidad.

Los primeros fueron obtenidos mediante el software gratuito Google Earth a través de imágenes satelitales y herramientas propias del programa como regla y trazado.



Figura A1. Trazado tramo analizado río Bureo.

Tal como se observa en la imagen anterior se escogieron 5 ríos de la octava región los cuales se les aplicó el mismo procedimiento, se analizó el ancho de inundación (b_i) de cada río y en base a una relación de $L=2\pi b_i$ se obtuvo un largo de estudio, se obtiene su ancho normal, su pendiente en zonas de rápido y en zonas de pozón. Las zonas de rápido son claramente identificables ya que se presentan de una tonalidad más clara que el resto del agua además tienen presencia de zonas blancas como espuma debido a las corrientes que se generan.

Una vez trazado el largo de estudio el programa permite ver los perfiles de elevación del terreno lo que permite obtener las pendientes de las zonas ya sea calculándolas por diferencia de cotas como obteniéndolas directamente del programa. En la siguiente imagen se aprecia la forma en que el programa las entrega.

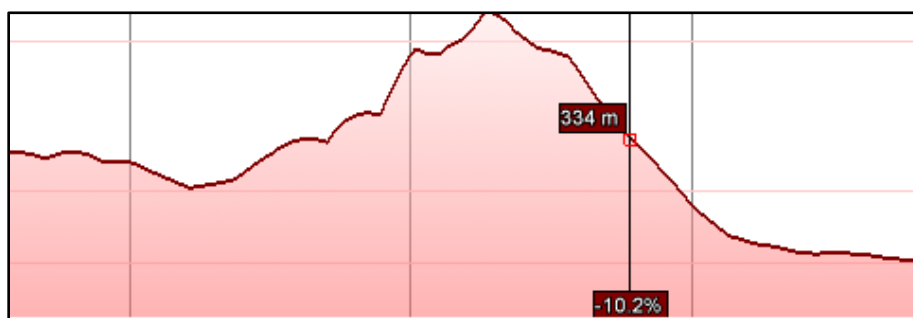


Figura A2. Perfil de elevación analizado río Bureo.

Los ríos estudiados fueron cinco: río Laja, río Bureo, río Cato, río Duqueco y río Itata los resultados se entregan a continuación para cada uno de los ríos.

Tabla A.1 Parámetros geométricos río Laja.

	Ancho Inundable (m)	Ancho Normal (m)	Largo Estudio (m)	Separación R-P (m)	Largo Rápido (m)	Pendiente en río %	Pendiente en rápido %
Río Laja	400	120	2500	180	70	0.3	N.A
				160	65		N.A
				120	72		N.A
				180	68		N.A
				150	60		N.A
				180	75		N.A
				166	70		N.A
				130	70		N.A
				120	68		N.A
Promedio	400	120	2500	154	69	0.3	N.A

Tabla A.2 Parámetros geométricos río Duqueco.

	Ancho Inundable (m)	Ancho Normal (m)	Largo Estudio (m)	Separación R-P (m)	Largo Rápido (m)	Pendiente en río %	Pendiente en rápido %
Río Duqueco	40	40	320	170	60	0.27	N.A
				152	50		N.A
Promedio	40	40	320	161	55	0.27	N.A

Tabla A.3 Parámetros geométricos río Bureo.

	Ancho Inundable (m)	Ancho Normal (m)	Largo Estudio (m)	Separación R-P (m)	Largo Rápido (m)	Pendiente en río %	Pendiente en rápido %
Río Bureo	344	120	2160	60	40	0.14	12.1
				160	60		10.3
				160	67		10.7
				147	55		7.6
				160	65		8.2
				240	83		8.8
				140	64		9.4
				150	70		9.7
				150	64		7.9
				163			
Promedio	344	120	2160	153	63	0.33	9.4

Tabla A.4 Parámetros geométricos río Itata.

	Ancho Inundable (m)	Ancho Normal (m)	Largo Estudio (m)	Separación R-P (m)	Largo Rápido (m)	Pendiente en río %	Pendiente en rápido %
Río Itata	540	150	3400	118	55	0.31	7.7
				120	63		7.9
				120	64		8.1
				110	60		8.8
				140	75		9.5
				170	83		10.3
				200	86		10.0
				120	60		8.8
				210	94		9.1
				200	88		7.3
Promedio	540	150	3400	150.8	73	0.31	8.8

Nota: Río de montaña, rápidos producidos por cambios de pendientes.

Tabla A.5 Parámetros geométricos río Cato.

	Ancho Inundable (m)	Ancho Normal (m)	Largo Estudio (m)	Separación R-P (m)	Largo Rápido (m)	Pendiente en río %	Pendiente en rápido %
Río Cato	140	90	880	150	78	0.3	6.6
				91	40		8.7
				200	84		9.7
				50	35		12.3
				43	30		9.7
Promedio	140	90	880	106.8	53	0.3	9.4

Luego se promedian los resultados de cada río para obtener los datos promedios a utilizar en el modelo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla A.6 Parámetros geométricos promedio.

	ancho inundable	ancho normal	Largo estudio	separacion R-P	largo rapido	pendiente %
rio laja	400	120	2500	154	69	0.3
duqueco	40	40	320	161	55	0.27
rio bureo	344	120	2160	153	63	0.33
rio itata	540	150	3400	150.8	72.8	0.31
rio cato	140	90	880	106.8	53.4	0.3
Rio Promedio	292.8	104	1852	145.12	62.6	0.30
des. Est.	201.54	41.59	1245.28	21.76	8.42	0.02
C.V (%)	68.83	39.99	67.24	14.99	13.45	7.18

No Aplica: Los ríos Laja y Duqueco indican no aplica en la columna de pendiente de rápido debido a que sus rápidos se producen a causa que son ríos trezado y meandrico respectivamente en las zonas analizadas con lo cual su pendiente es igual a la de río y estos se producen debido a otras características diferentes a los cambios de pendiente.

Los datos hidráulicos por su parte fueron obtenidos mediante archivos de la DGA “Análisis de eventos hidrometeorológicos extremos en el país. Caudales máximos y mínimos”, además de los proyectos de títulos “Análisis estadístico de caudales máximos y mínimos instantáneos en la región del Bío Bío” e “Análisis estadístico de caudales en la región del Bío Bío” elaborados por Sánchez (2009) y Sepúlveda (2008) respectivamente.

Tabla A.7 Parámetros hidráulicos para diferentes períodos de retorno en m³/s.

	Caudal Base	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
Rio Laja	227	864.8	1411	1823	2253	2397	2859	3351
Rio Duqueco	95.74	775.5	1060	1209	1332	1368	1471	1563
Rio Bureo	67.4	474.3	644.3	756.8	864.7	898.9	1004	1109
Rio Itata	69.87	478.6	714.9	871.3	1021	1168	1215	1361
Rio Cato	77.16	647.5	896.5	1026	1134	1165	1255	1336
Rio Promedio	107.434	648.14	945.34	1137.22	1320.94	1399.38	1560.8	1744
desv. est.	67.8	174.7	306.6	419.3	548.2	582.1	744.4	912.6
C.V (%)	63.1	27.0	32.4	36.9	41.5	41.6	47.7	52.3

Tabla A.8 Rugosidades de Manning para causas naturales.

Corrientes Naturales	
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente	0,027-0,033
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente, algo de vegetación	0,033-0,040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0,060-0,080
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados, vegetación densa	0,100-0,200 ¹
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0,050-0,080
Areas de inundación adyacentes al canal ordinario	0,030-0,200 ¹

**Fuente: S.M. Woodward and C. J Posey
"Hydraulics of steady flow in open channels".**

ANEXO B

Modelo a escala

El principal problema de la mecánica de fluidos radica en trabajar de forma conjunta con todas las fuerzas presentes: fuerzas de gravedad, fuerzas de presión, fuerzas de viscosidad, fuerzas de compresibilidad, fuerzas de tensión superficial y fuerzas de inercia.

La dificultad radica en que no se puede mantener la semejanza dinámica para todas las fuerzas actuantes sobre un modelo hidráulico. Existen limitaciones que se presentan a la hora de poder variar mediante una relación de escala, algunos de los parámetros que intervienen en el problema. El ejemplo más claro es la gravedad, pero no el único, ya que la presión también es difícil alterarlo. Se ha podido realizar en algunos ensayos utilizando una cámara isobárica. La sustitución del fluido a ensayar por otro de distinta viscosidad más ajustado a la reducción de escalas dependerá de la disponibilidad de este para los volúmenes y caudales requeridos en el ensayo. Adicionalmente pueden ser necesarios equipos de bombeo capaces de manejar este fluido si hay que ponerlo en movimiento.

Si observamos ahora los monomios adimensionales más habitualmente utilizados en los problemas de hidráulica, el número de Froude y el número de Reynolds. Si mantenemos la viscosidad del fluido y evidentemente la gravedad, es imposible satisfacer de forma conjunta ambas ecuaciones. Esto implica que a la hora de realizar un modelo a escala, debe evaluarse el fenómeno físico predominante, gravedad o viscosidad, y realizar el modelo sobre la base del mantenimiento de la relación predominante. Se ha comprobado que el error cometido con la simplificación realizada no tiene gran influencia en el modelo.

Figura B.1 Números adimensionales más destacados en hidráulica.

Magnitud física	Definición	Magnitudes relacionadas	Importancia hidráulica
Nº Froude	$F^2 = \frac{v^2}{c^2}$	$\frac{F_{inercia}}{F_{gravedad}}$	Superficie libre
Nº Reynolds	$Re = \frac{\rho D v}{\nu}$	$\frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}}$	Siempre
Nº Weber	$We = \frac{\rho v L}{\gamma}$	$\frac{F_{inercia}}{F_{tension\ superficial}}$	Superficie libre
Nº Mach	$Ma = \frac{v}{a}$	$\frac{F_{inercia}}{F_{elastica}}$	Fluidos compresibles
Nº Euler	$Ca = \frac{p-p_0}{\rho v}$	$\frac{F_{inercia}}{F_{presion}}$	Cavitación

Escala reducida:

Sea “a” el valor de una variable en el prototipo en un punto P en un instante de tiempo t, y sea “a’” el valor de la misma variable en el modelo en el punto P’ en el instante de tiempo t’. Entonces aceptamos que existe un valor de escala que permanece constante en todo punto del modelo de modo que existe semejanza hidráulica, tal que $a = \lambda_a a'$, es decir, el modelo es homólogo al prototipo, donde:

$$\frac{a(x,y,z,t)}{a'(x',y',z',t')} = \lambda_a$$

Semejanza hidráulica o mecánica:

Para que el modelo sea homólogo o semejante al prototipo, es decir, para que el modelo sea representativo del fenómeno a estudiar, se debe presentar una similitud mecánica o hidráulica completa. Esto resulta difícil de conseguir por el efecto de la escala y características de los modelos que tienden a emplear el mismo medio que el usado en el prototipo, ya que se debe cumplir simultáneamente las tres semejanzas: geométrica, cinemática y dinámica:

a) Semejanza Geométrica

“Un modelo y prototipo son geoméricamente semejantes si, solo si, todas las dimensiones espaciales en las 3 coordenadas tienen la misma relación de escala lineal”.

Puede ocurrir que en 2 o 3 dimensiones, las componentes del modelo se deban distorsionar para permitir el análisis o mejor comprensión del fenómeno a estudiar. En tal caso se habla de modelos distorsionados.

b) Semejanza Cinemática

“Los movimientos de dos sistemas son cinemáticamente semejantes si partículas homologas alcanzan puntos homólogos en instantes homólogos”.

Luego, existiendo semejanza cinemática las líneas de corriente en el modelo deben ser homologas a la del prototipo. Así, cuando existe similitud geométrica, basta solo que exista una relación de tiempos para que se cumpla la semejanza cinemática.

c) Semejanza Dinámica

“Las fuerzas que actúan en el prototipo son homologas o semejantes a las fuerzas que actúan en el modelo poseen una relación lineal entre ellas”.

Para que exista similitud dinámica el requisito para que exista una sola escala de fuerzas es que los polígonos de fuerza para los elementos de masa correspondientes (prototipo y modelo) es que sean geoméricamente semejantes.

- Para flujo compresible se debe cumplir que los números de Reynolds, Mach y la relación de calores específicos correspondientes sean iguales.
- En el caso de flujo incompresible se tienen dos casos:
 - Flujo sin superficie libre: Los números de Reynolds debes ser iguales en modelo y prototipo.
 - Flujo con superficie libre: Los números de Reynolds, Froude y, si intervienen, los de Weber y cavitación del modelo y prototipo deben tener igual valor.
- La semejanza dinámica perfecta tiene sus dificultades, ya que la igualdad de los números de Reynolds y Froude solo se pueden conseguir con cambios importantes en las propiedades de los fluidos.

Semejanza de Froude

Se utiliza cuando tenemos problemas con superficie libre donde las fuerzas predominantes son las gravitatorias. Como ejemplos pueden tenerse los problemas de oleaje, canales, vertederos, resaltos, desagües etc.

Supongamos que utilizamos λ , para expresar la relación geométrica entre las dimensiones del prototipo L y del modelo L_0 :

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

El valor de λ corresponde a la relación de escala entre ambos. Ahora bien si utilizamos una semejanza de Froude estamos afirmando que el monomio adimensional dado por:

$$F^2 = \frac{v^2}{g * L}$$

Permanece constante entre el prototipo y el modelo. Ello implica que:

$$F^2 = \frac{v^2}{g * L} = \frac{v^2}{g_0 * L_0} = \text{cte.}$$

Esto implica que: $\frac{v^2}{v_0^2} = \frac{g * L}{g_0 L_0}$

Como la gravedad (g) no variara entre el modelo y el prototipo suponemos ésta constante:

$$\frac{g}{g_0} = 1 \rightarrow \frac{v^2}{v_0^2} = \frac{L}{L_0} \rightarrow \frac{v^2}{v_0^2} = \frac{L}{\frac{L}{\lambda}} \rightarrow \frac{v}{v_0} = \sqrt{\lambda}$$

Conocida la longitud y la velocidad el tiempo es una magnitud derivada, por tanto:

$$t = \frac{L}{v} \rightarrow \frac{t}{t_0} = \frac{\frac{L}{L_0}}{\frac{v}{v_0}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda}$$

El caudal es una unidad derivada de la longitud (volumen) y el tiempo, dada por:

$$Q = \frac{L^3}{t} \rightarrow \frac{Q}{Q_0} = \frac{\frac{L^3}{L_0^3}}{\frac{t}{t_0}} = \frac{\lambda^3}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda^5}$$

La única unidad fundamental que no hemos expresado es la masa (M), que si la obtenemos a través de la densidad (ρ) y el volumen (V) como:

$$M = \rho * V \rightarrow \frac{M}{M_0} = \frac{\rho * L^3}{\rho_0 * L_0^3} = \frac{\rho}{\rho_0} \lambda^3$$

Siendo ρ y ρ_0 las densidades en el prototipo y modelo respectivamente. En el caso de que el fluido sea el mismo, lo que es bastante habitual, se tendrá la relación de escalas para la masa dada por:

$$\frac{M}{M_0} = \lambda^3$$

Además la rugosidad se obtiene:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{v_0}{v} \sqrt{\frac{I * Rh^{\frac{4}{3}}}{I_0 * Rh_0^{\frac{4}{3}}}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\lambda^{\frac{4}{3}}} = \lambda^{\frac{1}{6}}$$

Tabla B.1 Selección de escala.

	Canal (modelo)	Prototipo	Escala Lp/Lm
Ancho (m)	0.48	104	217
Largo (m)	12	1852	154

Se decidió utilizar una escala de 1:200 debido a que es la que mejor se ajusta a las condiciones geométricas del canal.

Tabla B.2 Comparación modelo vs real en escala 1:200

	Prototipo	Canal
Ancho (m)	96	0.48
Largo (m)	2400	12
Largo rápido (m)	60	0.3
Largo pozón (m)	160	0.8
Rugosidad	0.035	0.014
Pendiente pozón (%)	0.3	0.3
Pendiente rápido (%)	9.4	9.4

Tabla B.3 Caudales en escala 1:200 medidos en litros/seg.

	Caudal Base	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100
		Río Laja	0.40	1.53	2.49	3.22	3.98	4.24
Río Duqueco	0.17	1.37	1.87	2.14	2.35	2.42	2.60	2.76
Río Bureo	0.12	0.84	1.14	1.34	1.53	1.59	1.77	1.96
Río Itata	0.12	0.85	1.26	1.54	1.80	2.06	2.15	2.41
Río Cato	0.14	1.14	1.58	1.81	2.00	2.06	2.22	2.36
Río Promedio	0.19	1.15	1.67	2.01	2.34	2.47	2.76	3.08

Debido a que para generar los caudales el laboratorio posee cuatro bombas y una llave para regular el caudal circulante por el canal, es muy difícil lograr generar los caudales promedio, sin embargo si se pueden generar los caudales del Río Laja al poseer un volumen mayor por lo que para la realización de los ensayos se decidió utilizar éstos además se agregaron 2 caudales que podían ser generados por la combinación de bombas y llave. Siendo los caudales utilizados finalmente los siguientes:

Tabla B.3 Caudales para diferentes períodos de retorno en escala real

	Caudal Base	T<2	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100	T>100
		Caudales (m ³ /s)	227	345	864.8	1411	1823	2253	2397	2859

Tabla B.4 Caudales para diferentes períodos de retorno en escala 1:200

	Caudal Base	T<2	T=2	T=5	T=10	T=20	T=25	T=50	T=100	T>100
Caudales (lts/s)	0.40	0.61	1.53	2.49	3.22	3.98	4.24	5.05	5.92	7.50

Para escoger el tipo de diseño que tendría el modelo a emplear se selecciono un río de montaña tipo D como se muestra en la siguiente tabla:

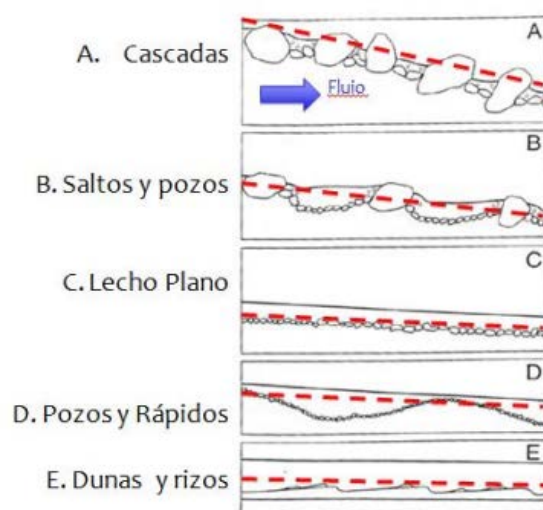


Figura B.2 Tipos de lecho para ríos de montaña. (Montgomery y Buffington, 1997)

ANEXO C

Protocolo calibración canal de laboratorio

En la siguiente imagen se muestra el modelo del canal que se utilizó para realizar los ensayos en base a los datos obtenidos anteriormente.

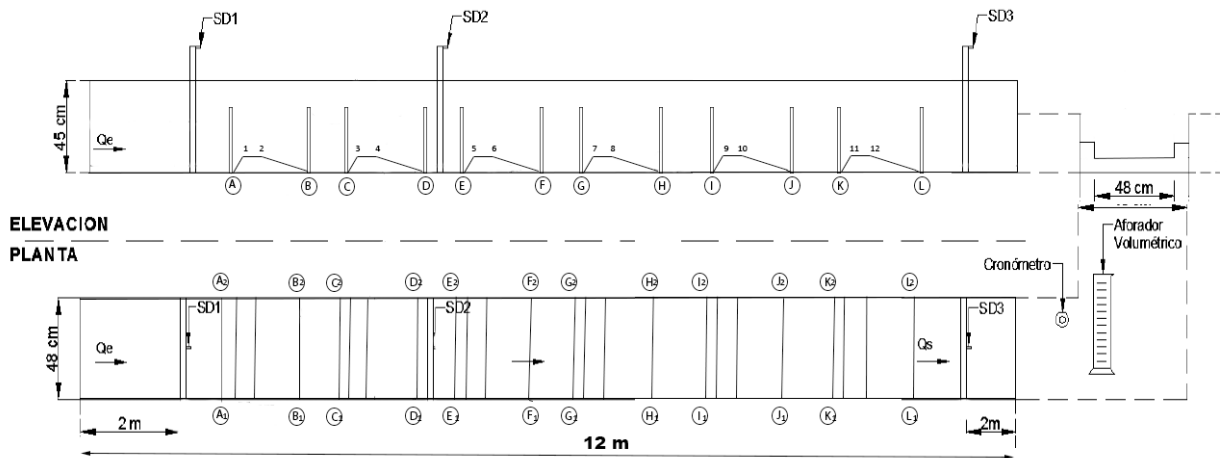


Figura C1. Modelo río construido en laboratorio.

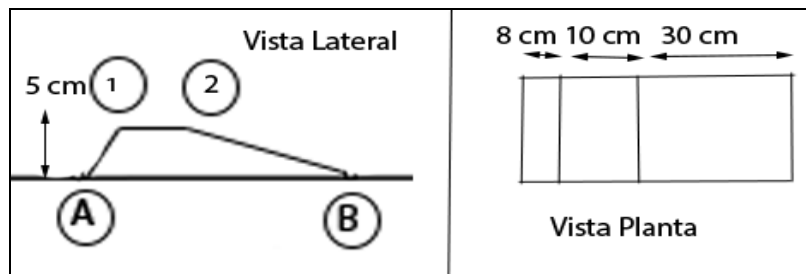


Figura C2. Esquema del rápido construido.

En la figura C1 se aprecia un esquema en elevación y planta del canal de laboratorio, este debió sufrir correcciones al construirse para evitar distorsiones del modelo. En primer lugar el canal de laboratorio utilizado posee una pendiente lateral que provoca una altura mayor en uno de los lados del canal con respecto al otro. Para solucionar estos inconvenientes al momento de construir los rápidos mostrados en la figura C2 se debió corregir con una precisión de ± 1 mm en los puntos señalados como 1 y 2 respectivamente (del 1 al 12 a lo largo del canal) de tal forma que las alturas alcanzadas en dichos puntos fueran iguales al medirlas desde el lado izquierdo o derecho del canal.

Cabe mencionar que estos rápidos fueron construidos con un núcleo de madera y revestidos de un acrílico de 3 mm de espesor y sellado para evitar filtraciones por sellador poliuretano Sikaflex 11 FC Sika.

Debido a que el canal presenta una curvatura longitudinalmente principalmente en el centro para dejar el canal con una pendiente 0° u nula se fija a una altura de 11 cm (en la manilla ubicada aguas abajo del canal) con esto se procede a realizar la ubicación y calibración de las reglas de medición manual que poseen una precisión de ± 1 mm, para ello se ubica una de las reglas al comienzo del canal y se procede a llenar el canal hasta una altura determinada en este caso 185 mm indicados en la primera regla instalada y ubican las demás reglas en los puntos señalados en la figura C1 (desde la A hasta la L) en ambos lados del canal de modo tal que cada una de las 24 reglas instaladas indiquen la misma cota de agua en este caso 185 mm. Luego se prueban diferentes niveles de agua tanto mayores como menores con lo cual se debe obtener las mismas alturas en todas las reglas instaladas.

Cuando esto sucede ya se posee un sistema de medición uniforme a lo largo del canal, sin embargo debido a la pendiente lateral del canal las diferencias entre cada costado del canal hacen inexactos las alturas medidas por las cotas de agua, es por esto que se necesita calibrar y corregir estas cotas de forma de obtener la altura de agua real en el centro del canal en cada punto de control instalado desde A hasta L. Para ello se utiliza una regla metálica que parte desde 0 en su extremo y se procede a calcular la diferencia que existe respecto al fondo del canal entre cada regla instalada, Debido a que tenemos dos reglas instaladas por cada punto es que podemos obtener el promedio de las diferencias de altura en cada punto y con aquella diferencia al sumarla a la cota de agua podremos obtener la altura de agua real al centro del canal.

Debido a que los rápidos fueron construidos de forma tal que las alturas a ambos costados sean iguales no requieren de esta corrección.

A continuación se presentan dichas correcciones que nos permitirán obtener las alturas de agua o nivel de escurrimiento presente en el centro del canal.

Tabla C.1 Correcciones de altura para.

Lado Pizarra	mm	Lado Mesón Carpintería	mm	punto central	mm
A1=	5	A2=	-4	A=	0.5
B1=	1	B2=	-4	B=	-1.5
C1=	-1	C2=	-5	C=	-3
D1=	-3	D2=	-6	D=	-4.5
E1=	-3	E2=	-7	E=	-5
F1=	-4	F2=	-3	F=	-3.5
G1=	2	G2=	-4	G=	-1
H1=	2	H2=	-3	H=	-0.5
I1=	6	I2=	-4	I=	1
J1=	6	J2=	-3	J=	1.5
K1=	-2	K2=	-6	K=	-4
L1=	3	L2=	-4	L=	-0.5

Una vez obtenido calibrado el sistema de medición manual del canal, se procede a ubicarlo a la pendiente correspondiente, dado que la pendiente nula se encuentra a una diferencia de altura de 11 cm del canal y la pendiente de la zona en régimen lento del modelo se produce con una pendiente de 0.3% se ubica el canal a una diferencia de altura de 14 cm.

ANEXO D

Protocolo calibración y códigos de software

Calibración de equipos

- Calibración de sensores de distancia.

La calibración de los sensores se realizó con un vertedor cerrado vertical como control aguas abajo, y una pendiente del canal $J=0.0116$, el cual se llevó a cabo con el siguiente procedimiento:

- Abastecer el canal con agua hasta una altura de 30 cm medidos en una regla ubicada a los 2.5 metros del inicio del canal en el punto A.
- Aguardar a lo menos 5 minutos o el tiempo suficiente, hasta cuando el agua del canal se encuentre en estado de régimen permanente.
- Adquirir la medición de la altura de escurrimiento, en forma manual, utilizando la regla ya mencionada, ya que será como nivel de referencia.
- Se inicia el descenso del nivel de agua por una válvula dispuesta antes del inicio del canal en el estanque rectangular, para alcanzar alturas de escurrimiento más bajas.
- Los ítems anteriores se repiten en forma iterativa desde alturas de escurrimiento altas, hasta la más baja posible.
- En cada altura se tiene registro de las lecturas obtenidas por los 3 sensores de distancia y además la lectura en forma manual, las cuales se grafican para obtener la ecuación de calibración de cada uno de los sensores, Señales de sensores (mV) v/s Nivel de referencia (mm).
- Finalmente de las curvas de tendencias adjudicadas de cada sensor en el gráfico, se despeja el nivel de referencia para así obtener altura de escurrimiento en función de la señal de los sensores, entregando lectura en milímetros.

➤ Calibración del vertedor.

La calibración se lleva a cabo con un vertedor rectangular que cubre la totalidad del ancho del canal y posee una altura igual a la de los rápidos (5 cm), la cual se lleva a cabo a través del siguiente procedimiento:

- Abastecer el canal con agua, a través de la válvula o las bombas que alimentan el canal.
- Aguardar a lo menos 5 minutos o el tiempo suficiente para que el agua en el canal alcance el estado de régimen permanente.
- Tomar la altura de escurrimiento del sensor SD3 y registrar la medición de caudal utilizando un recipiente de volumen conocido y un cronómetro, para aforos volumétricos.
- Los ítems anteriores se repiten, generando aumentos y descensos del nivel de agua.
- En cada altura de escurrimiento se tiene un caudal asociado, por ende se grafica Caudal (l/s) v/s Lectura sensor SD3 (V), así se obtiene la curva de descarga del vertedor a través de una curva de tendencia, que entrega finalmente el caudal en litros/segundo.

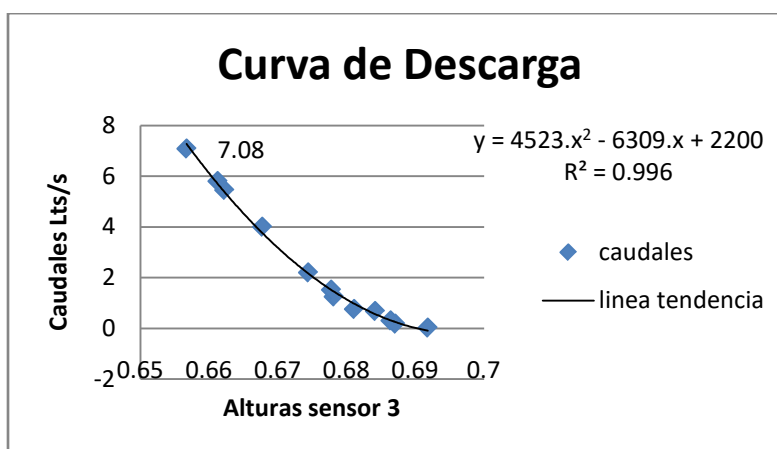


Figura D1. Grafico curva descarga con caudales desde 0.025 a 7.08 (Lts/s)

Código Arduino para ensayos experimentales con curvas de calibraciones

```
#define PinAltura1 5

#define PinAltura2 6

#define PinAltura3 8

#define LargoMaxPulso 18000

//#define temp1 9

#define temp2 7

#define temp3 1

void setup()

{

  analogReference(INTERNAL1V1);

  Serial.begin(9600);

  pinMode(PinAltura1, OUTPUT);

  digitalWrite(PinAltura1, LOW);

  pinMode(PinAltura2, OUTPUT);

  digitalWrite(PinAltura2, LOW);

  pinMode(PinAltura3, OUTPUT);

  digitalWrite(PinAltura3, LOW);

}
```

```
void loop()
{
  int Nref =5;

  float suma1 = 0, suma2 = 0, suma3 = 0, num = 0, Dista1=0, Dista2=0, Dista3=0, Q=0;

  float duracion1 = 0, duracion2 = 0, duracion3 = 0, Distancia1 = 0, Distancia2 = 0,
  Distancia3 = 0;

  float dura1 = 0, dura2= 0, dura3 = 0;

  do
  {
    // suma1 = suma1 + analogRead(temp1);

    suma2 = suma2 + analogRead(temp2);

    suma3 = suma3 + analogRead(temp3);

    num = num + 1;

    digitalWrite(PinAltura1,HIGH);

    delayMicroseconds(5);

    digitalWrite(PinAltura1,LOW);

    delayMicroseconds(60);

    pinMode(PinAltura1, INPUT);

    duracion1 = pulseIn(PinAltura1, HIGH, LargoMaxPulso);

    dura1 = dura1 + duracion1;

    delayMicroseconds(200);
```

```
pinMode(PinAltura1, OUTPUT);

digitalWrite(PinAltura2,HIGH);

delayMicroseconds(5);

digitalWrite(PinAltura2,LOW);

delayMicroseconds(60);

pinMode(PinAltura2, INPUT);

    duracion2 = pulseIn(PinAltura2, HIGH, LargoMaxPulso);

    dura2 = dura2 + duracion2;

delayMicroseconds(200);

pinMode(PinAltura2, OUTPUT);

digitalWrite(PinAltura3,HIGH);

delayMicroseconds(5);

digitalWrite(PinAltura3,LOW);

delayMicroseconds(60);

pinMode(PinAltura3, INPUT);

    duracion3 = pulseIn(PinAltura3, HIGH, LargoMaxPulso);

    dura3 =dura3 + duracion3;

delayMicroseconds(200);

pinMode(PinAltura3, OUTPUT);

} while (num < Nref);

//float temperatura1 = (1100.0 * (suma1/Nref - 0.1566)/10.096)/1023.0;
```



```

float temperatura2 = (1100.0 * (suma2/Nref + 0.5543)/10.635)/1023.0 + 2.53 ;

float temperatura3 = (1100.0 * suma3/Nref/10.0)/1023.0;

  Dista1 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura1/Nref+ 0.0; // En milímetros

  Dista2 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura2/Nref - 0.0; // En milímetros

  Dista3 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura3/Nref + 0.0; // En milímetros

Distancia1= ((695.48-Dista1)/0.9842);

Distancia2= ((686.58-Dista2)/1.001);

Distancia3= ((754.51-Dista3)/0.9841);

Q= 4523*(Dista3/1000)*(Dista3/1000) - 6309*(Dista3/1000) + 2200;

Serial.print(millis()/1000.0,1);

Serial.print('\t');

// Serial.print(temperatura1,1);

// Serial.print('\t');

Serial.print(temperatura2,2);

Serial.print('\t');

Serial.print(temperatura3,2);

Serial.print('\t');

Serial.print(Distancia1,1);

Serial.print('\t');

Serial.print(Distancia2,1);

Serial.print('\t');

```

```
Serial.print(Distancia3,1);  
  
Serial.print('\t');  
  
Serial.println(Q,2);  
  
delay(920);  
  
}
```

ANEXO E

Resultados

La Tabla E1 muestra las cotas obtenidas mediante los sistemas de medición presentes en el canal para cada ensayo realizado.

Tabla E1. Cotas obtenidas en ensayos para cada período de retorno, alturas en mm.

Altura de agua medida sin corregir en milímetros										
	227 m3/s	345 m3/s	865 m3/s	1411 m3/s	1823 m3/s	2253 m3/s	2397 m3/s	2859 m3/s	3351 m3/s	4243 m3/s
Punto	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
SD1	56.7	60.0	68.5	74.4	77.2	81.3	82.3	87.6	92.0	96.0
A	58.0	60.0	69.0	75.0	79.0	82.0	83.0	88.0	92.0	96.0
1	6.5	8	12	14	18	20	21	24	28	30
2	4	5	9	11	14	16.5	17.5	21	22	26
B	58.0	61.0	68.0	75.0	78.0	81.0	83.0	87.0	91.0	96.0
C	62.0	63.0	72.0	77.0	80.0	84.0	85.0	90.0	95.0	99.0
3	6	7	11.5	13	17	19.5	21	24	28	30
4	4	5	10	10	15	17	18	21	23	26
D	62.0	64.0	72.0	77.0	80.0	84.0	85.0	90.0	95.0	99.0
SD2	58.9	61.3	69.1	75.0	78.3	82.8	83.1	89.3	91.4	95.8
E	64.0	68.0	75.0	80.0	84.0	88.0	88.0	95.0	97.0	102.0
5	5.5	8.5	11	13	16	19	20.5	24	28	30.5
6	4	5	9.5	10	15	17	18	20	23	26
F	61.0	66.0	73.0	78.0	80.0	84.0	84.0	88.0	94.0	98.0
G	61.0	65.0	71.0	77.0	80.0	85.0	86.0	90.0	93.0	98.0
7	6	8	11	14	17	20	21	24	28	30.5
8	4	5	9.5	11	15	18	18.5	20	23	26
H	59.0	64.0	68.0	76.0	78.0	84.0	85.0	89.0	92.0	95.0
I	61.0	65.0	71.0	77.0	79.0	83.0	84.0	88.0	91.0	95.0
9	7	8.5	11.5	13	16.5	19	21	24	28	30
10	4	5	9	11	15.5	18	18	21	23	26
J	58.0	60.0	67.0	75.0	77.0	82.0	83.0	87.0	90.0	93.0
K	65.0	70.0	76.0	83.0	84.0	88.0	89.0	93.0	96.0	100.0
11	6	7	11.5	13.5	17	19	21.5	24	28	30
12	4	5	9	11	15	17	18	21	23	26
L	62.0	65.0	71.0	78.0	80.0	84.0	85.0	89.0	92.0	95.0
SD3	62.1	67.1	73.4	78.1	81.9	84.2	85.3	89.3	91.6	94.7

Debido a que como se menciona en el Anexo C es necesario aplicarle una corrección de altura a estas cotas para obtener las alturas reales de agua presentes en cada ensayo realizado, dichas alturas corregidas se muestran en la tabla E2 siguiente:

Tabla E2. Cotas obtenidas en ensayos para cada período de retorno, alturas en mm.

Altura de agua medida corregidas en milímetros										
	227 m3/s	345 m3/s	865 m3/s	1411 m3/s	1823 m3/s	2253 m3/s	2397 m3/s	2859 m3/s	3351 m3/s	4243 m3/s
Punto	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
SD1	56.7	60.0	68.5	74.4	77.2	81.3	82.3	87.6	92.0	96.0
A	58.5	60.5	69.5	75.5	79.5	82.5	83.5	88.5	92.5	96.5
1	6.5	8	12	14	18	20	21	24	28	30
2	4	5	9	11	14	16.5	17.5	21	22	26
B	56.5	59.5	66.5	73.5	76.5	79.5	81.5	85.5	89.5	94.5
C	59.0	60.0	69.0	74.0	77.0	81.0	82.0	87.0	92.0	96.0
3	6	7	11.5	13	17	19.5	21	24	28	30
4	4	5	10	10	15	17	18	21	23	26
D	57.5	59.5	67.5	72.5	75.5	79.5	80.5	85.5	90.5	94.5
SD2	58.9	61.3	69.1	75.0	78.3	82.8	83.1	89.3	91.4	95.8
E	59.0	63.0	70.0	75.0	79.0	83.0	83.0	90.0	92.0	97.0
5	5.5	8.5	11	13	16	19	20.5	24	28	30.5
6	4	5	9.5	10	15	17	18	20	23	26
F	57.5	62.5	69.5	74.5	76.5	80.5	80.5	84.5	90.5	94.5
G	60.0	64.0	70.0	76.0	79.0	84.0	85.0	89.0	92.0	97.0
7	6	8	11	14	17	20	21	24	28	30.5
8	4	5	9.5	11	15	18	18.5	20	23	26
H	58.5	63.5	67.5	75.5	77.5	83.5	84.5	88.5	91.5	94.5
I	62.0	66.0	72.0	78.0	80.0	84.0	85.0	89.0	92.0	96.0
9	7	8.5	11.5	13	16.5	19	21	24	28	30
10	4	5	9	11	15.5	18	18	21	23	26
J	59.5	61.5	68.5	76.5	78.5	83.5	84.5	88.5	91.5	94.5
K	61.0	66.0	72.0	79.0	80.0	84.0	85.0	89.0	92.0	96.0
11	6	7	11.5	13.5	17	19	21.5	24	28	30
12	4	5	9	11	15	17	18	21	23	26
L	61.5	64.5	70.5	77.5	79.5	83.5	84.5	88.5	91.5	94.5
SD3	62.1	67.1	73.4	78.1	81.9	84.2	85.3	89.3	91.6	94.7

Con estos resultados se aprecia como el flujo tiende a incrementar hasta su altura normal a lo largo del tramo en pozón alcanzando en algún punto su altura normal, al llegar a algún rápido la altura decrece acercándose a la crítica, luego de pasar por el rápido el ciclo se repite en el punto de medición inmediatamente después del rápido la altura alcanza una mayor a la crítica sin embargo no alcanza la normal hasta algún punto dentro del tramo de pozón.

Por lo cual se aprecia que al momento de entrar al rápido, debido al cambio de una pendiente suave a una pendiente fuerte se produce un flujo gradualmente variado entre los puntos de medición inmediatamente antes del rápido y los señalados con números justo sobre este.

Mientras que en algún punto del tramo de rápido y el inicio del tramo de pozón se produce un flujo rápidamente variado alcanzando una altura muy cercana a la normal.

Además se obtuvieron las pendientes de cada pozón las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla E3. Pendientes línea de energía en cada tramo de pozón (m/m).

Tramo	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
S1-A	0.04	0.01	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
B-C	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02
D-E	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.06	0.02	0.03
F-G	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.06	0.02	0.03
H-I	0.04	0.03	0.06	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
J-K	0.02	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
L-S3	0.02	0.06	0.07	0.01	0.06	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Promedio	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02

Además se obtuvieron los números de Froude y Reynolds para punto de medición los cuales se aprecian en la Tabla E4 y Tabla E5 respectivamente.

Tabla E4. Números de Froude para cada sección.

Punto	números de froude									
	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
SD1	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17
A	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17
1	0.51	0.57	0.77	1.00	0.89	0.94	0.93	0.90	0.84	0.96
2	1.05	1.15	1.19	1.44	1.29	1.25	1.22	1.10	1.21	1.19
B	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17
C	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17
3	0.57	0.69	0.83	1.12	0.97	0.97	0.93	0.90	0.84	0.96
4	1.05	1.15	1.02	1.66	1.17	1.19	1.17	1.10	1.13	1.19
D	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.13	0.14	0.17
SD2	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17
E	0.02	0.03	0.05	0.08	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.17
5	0.65	0.52	0.88	1.12	1.06	1.01	0.96	0.90	0.84	0.94
6	1.05	1.15	1.10	1.66	1.17	1.19	1.17	1.19	1.13	1.19
F	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.14	0.14	0.17
G	0.02	0.03	0.05	0.08	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
7	0.57	0.57	0.88	1.00	0.97	0.94	0.93	0.90	0.84	0.94
8	1.05	1.15	1.10	1.44	1.17	1.10	1.12	1.19	1.13	1.19
H	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
I	0.02	0.02	0.05	0.08	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
9	0.45	0.52	0.83	1.12	1.01	1.01	0.93	0.90	0.84	0.96
10	1.05	1.15	1.19	1.44	1.11	1.10	1.17	1.10	1.13	1.19
J	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
K	0.02	0.02	0.05	0.07	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
11	0.57	0.69	0.83	1.06	0.97	1.01	0.90	0.90	0.84	0.96
12	1.05	1.15	1.19	1.44	1.17	1.19	1.17	1.10	1.13	1.19
L	0.02	0.02	0.05	0.08	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17
SD3	0.02	0.02	0.05	0.08	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17

Tabla E5. Números de Reynolds para cada sección.

Punto	numeros de reynolds									
	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
SD1	2688	4055	9889	15792	20242	24700	26232	30738	35556	44509
A	2672	4048	9857	15737	20096	24608	26135	30654	35503	44443
1	3236	4905	12107	19548	24887	30524	32393	38143	44047	55389
2	3269	4965	12252	19781	25278	30940	32834	38582	45056	56222
B	2690	4061	9954	15838	20287	24839	26297	30936	35826	44709
C	2668	4055	9873	15812	20255	24723	26257	30794	35556	44509
3	3242	4924	12131	19625	24983	30583	32393	38143	44047	55389
4	3269	4965	12203	19860	25179	30880	32770	38582	44884	56222
D	2681	4061	9921	15888	20351	24839	26380	30936	35717	44709
SD2	2668	4037	9870	15762	20172	24585	26167	30579	35620	44536
E	2668	4014	9841	15762	20128	24570	26175	30515	35556	44377
5	3249	4895	12155	19625	25081	30642	32455	38143	44047	55287
6	3269	4965	12228	19860	25179	30880	32770	38730	44884	56222
F	2681	4021	9857	15787	20287	24762	26380	31032	35717	44709
G	2659	4001	9841	15712	20128	24494	26014	30607	35556	44377
7	3242	4905	12155	19548	24983	30524	32393	38143	44047	55287
8	3269	4965	12228	19781	25179	30760	32707	38730	44884	56222
H	2672	4008	9921	15737	20223	24532	26054	30654	35610	44709
I	2641	3975	9778	15614	20065	24494	26014	30607	35556	44509
9	3229	4895	12131	19625	25032	30642	32393	38143	44047	55389
10	3269	4965	12252	19781	25130	30760	32770	38582	44884	56222
J	2663	4034	9889	15688	20159	24532	26054	30654	35610	44709
K	2650	3975	9778	15565	20065	24494	26014	30607	35556	44509
11	3242	4924	12131	19586	24983	30642	32331	38143	44047	55389
12	3269	4965	12252	19781	25179	30880	32770	38582	44884	56222
L	2645	3995	9826	15638	20096	24532	26054	30654	35610	44709
SD3	2640	3961	9735	15609	19946	24479	25990	30579	35599	44682

Con estos resultados se graficaron para obtener el caracterizar el tipo de flujo presente en cada tramo, el cual se presenta en la Figura E1:

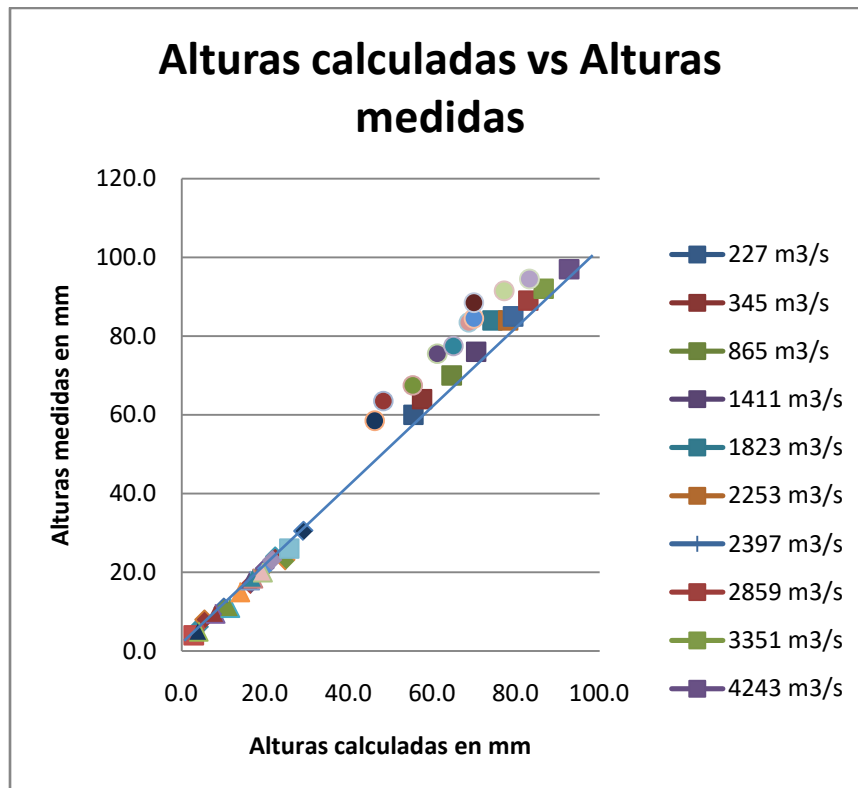


Figura E1. Grafico Número de Froude vs Número de Reynolds.

También se calcularon las pérdidas de energía en cada tramo las cuales se presentan en la Tabla E6:

	227 m3/s	345 m3/s	865 m3/s	1411 m3/s	1823 m3/s	2253 m3/s	2397 m3/s	2859 m3/s	3351 m3/s	4243 m3/s
Porcentaje %	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
Resalto	1.41	1.17	0.60	0.59	0.32	0.30	0.24	0.23	0.22	0.16
Zona de río	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
rio deprimido	0.4	0.4	0.37	0.31	0.3	0.26	0.22	0.2	0.2	0.15
torrente	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Además del modelo construido en el canal, se simuló cada uno de los ensayos en tamaño real mediante el software HEC-RAS para luego llevar los resultados a escala y comparar las altura de agua medidas con las alturas de agua calculadas.

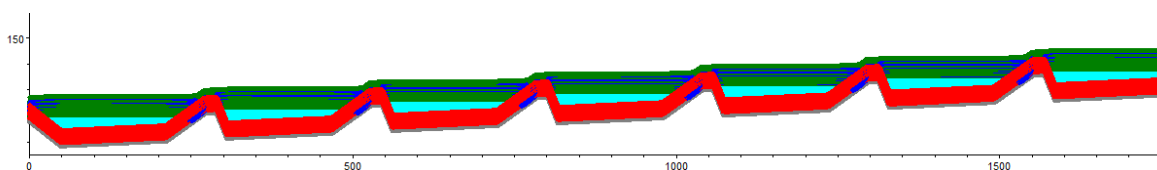


Figura E2. Grafico muestra la simulación en Hec-ras.

Debido a que la escala no permite apreciar correctamente, se modifico la escala de ploteo del eje Y en el software de manera de poder observar de mejor forma los ejes.

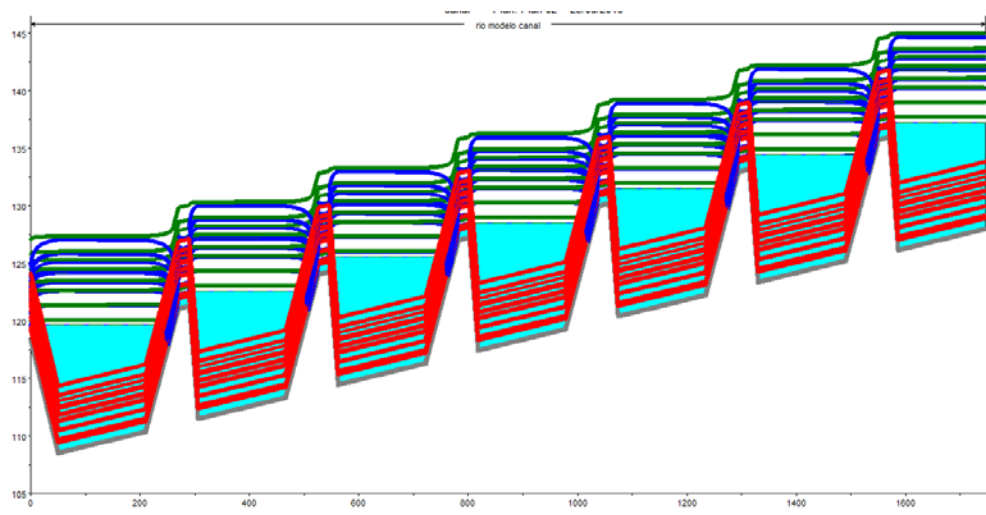


Figura E3. Grafico muestra la simulación en Hec-ras con distorsión en eje Y.

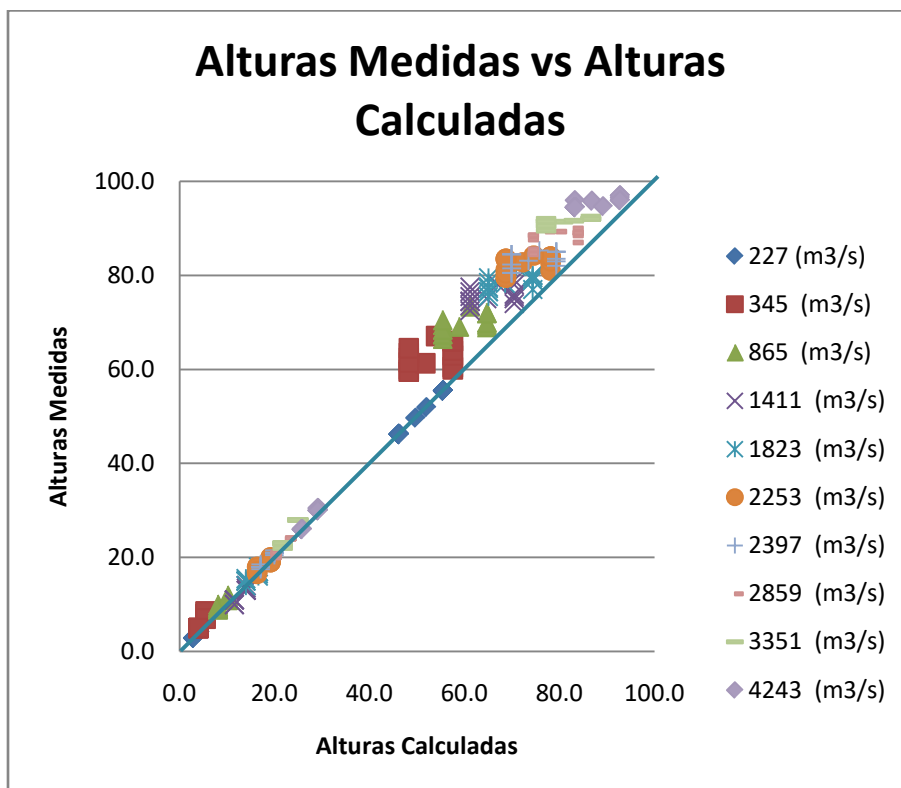
De manera de realizar un mejor análisis de comparación del modelo generado por Hec-ras y el modelo construido se tomaron las alturas obtenidas mediante el modelo Hec-ras y fueron llevadas a la escala 1:200, las cuales son presentadas en la tabla E7.

Tabla E7. Alturas obtenidas mediante HEC-RAS en escala 1:200.

Alturas medidas en HEC-RAS en metros										
	227 m3/s	345 m3/s	865 m3/s	1411 m3/s	1823 m3/s	2253 m3/s	2397 m3/s	2859 m3/s	3351 m3/s	4243 m3/s
Punto	BASE	T<2 AÑOS	T=2 AÑOS	T=5 AÑOS	T=10 AÑOS	T=20 AÑOS	T=25 AÑOS	T=50 AÑOS	T=100 AÑOS	T>100 AÑOS
SD1	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
A	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
1	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.1	19.9	22.4	24.9	29.1
2	2.9	4.0	8.1	11.6	14.0	16.3	17.1	19.4	21.7	25.8
B	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
C	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
3	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.1	19.9	22.4	24.9	29.1
4	2.9	4.0	8.1	11.6	14.0	16.3	17.1	19.4	21.7	25.8
D	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
SD2	49.7	51.8	58.8	64.7	68.6	72.3	73.5	77.1	80.7	86.8
E	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
5	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.1	19.9	22.4	24.9	29.1
6	2.9	4.0	8.1	11.6	14.0	16.3	17.1	19.4	21.7	25.8
F	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
G	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
7	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.2	20.0	22.4	24.9	29.2
8	2.9	4.0	8.1	11.5	14.0	16.3	17.0	19.4	21.7	25.8
H	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
I	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
9	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.2	20.0	22.4	24.9	29.2
10	2.9	4.0	8.1	11.5	14.0	16.3	17.1	19.4	21.7	25.8
J	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
K	55.5	57.5	64.6	70.5	74.4	78.1	79.3	83.0	86.6	92.7
11	4.1	5.5	10.1	14.0	16.6	19.2	20.0	22.4	24.9	29.2
12	2.9	4.0	8.1	11.6	14.0	16.3	17.1	19.4	21.7	25.8
L	46.2	48.3	55.3	61.1	65.0	68.7	69.9	73.5	77.2	83.2
SD3	52.0	54.0	61.1	67.0	70.9	74.6	75.8	79.4	83.0	89.2

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos del modelo a escala desarrollado en el canal de laboratorio de hidráulica y del modelo simulado en el software HEC-RAS. Dichos resultados son presentados en la Figura E4 mediante un gráfico de “Alturas medidas vs Alturas calculadas”.

Figura E4 Alturas medidas vs Alturas calculadas.



ANEXO F

Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales

En la carpeta del “Anexo F” disponible en el DVD del presente proyecto de título, se encuentran 10 carpetas con los 10 ensayos experimentales llevados a cabo. El nombre de estas carpetas son las siguientes: base, menos de 2 años, 2 años, 5 años, 10 años, 20 años, 25 años, 50 años, 100 años y más de 100 años. En cada una de estas carpetas se encuentran las corridas experimentales, 1 carpeta con las fotografías y video.

Corridas experimentales

Las corridas experimentales, que son los datos registrados en todos los ensayos por el Software Arduino son mostrados en formato texto (.txt), con el siguiente itemizado por columna:

Tiempo del experimento (s)	Sensor temperatura del agua (°C)	Sensor temperatura del ambiente (°C)	Altura de agua del sensor número uno (mm)	Altura de agua del sensor numero dos (mm)	Altura de agua del sensor numero 3 (mm)	Caudal de la curva de descarga (l/s)