



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Víctor Danilo Saico Bermeo

CI: 010588177-5

Renato Andrés Vivar Orellana

CI: 010490854-6

Director:

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar

CI: 010211455-0

**Cuenca - Ecuador**

26/04/2019



## Resumen

En obras hidráulicas para transporte de flujo a superficie libre, frecuentemente es necesario controlar la velocidad media a fin de que no se supere valores erosivos. Para este propósito, existen métodos empíricos basados en el concepto de rugosidad artificial. Los métodos disponibles, proponen construir, en el fondo del canal, elementos de formas geoméricamente regulares para así provocar un incremento de resistencias locales, disminuyendo la velocidad (Krochin, 1982). El método disponible más representativo, presenta valores del coeficiente de rugosidad de Chèzy para tipos de rugosidad establecidas como: doble zig zag, barrotes cortados, y barras continuas (Mostkov, 1954). Sin embargo, se desconoce aún aspectos relacionados con los efectos provocados por la variación de caudal, pendientes de fondo y longitud del tramo con rugosidad artificial.

En el presente trabajo, se plantea un estudio complementario para el método propuesto por Mostkov. Para el estudio, se ha realizado una experimentación en modelo físico de escala reducida no distorsionada. El modelo físico se implementó en un canal rectangular de 12 m de largo y 0.30 m de ancho, contemplándose variaciones de pendiente, caudal y configuración de la rugosidad artificial. En el estudio se analizó el desempeño de tres tipos de rugosidad artificial en una representación simplificada, -dinámica y geoméricamente similar al fenómeno de flujo analizado- y que responda a los factores asociados a variación y desarrollo del perfil de velocidad. El estudio establece para diferentes tipos de rugosidad su diseño, configuración y comportamiento.

**Palabras clave:** Rugosidad artificial, Modelo físico de escala reducida. Variación de velocidad.



### **Abstract**

In hydraulic projects for flow transport to free surface, it is often necessary to control the average speed in order not to exceed erosive values. For this purpose, there are empirical methods based on the concept of artificial roughness. The available methods propose to construct, at the bottom of the channel, elements of geometrically regular shapes in order to cause an increase of local resistances, decreasing the speed (Krochin, 1982). The most representative available method presents values of the Chèzy roughness coefficient for roughness types established as double zigzag, cut bars, and continuous bars (Mostkov, 1954). However, aspects related to the effects caused by the variation of flow, bottom slopes and length of the stretch with artificial roughness are still unknown.

In the present work, a complementary study is proposed for the method proposed by Mostkov. For the study, experimentation was carried out in a physical model with a reduced scale that was not distorted. The physical model was implemented in a rectangular channel 12 m long and 0.30 m wide, contemplating variations in slope, flow, and configuration of artificial roughness. The study analyzed the performance of three types of artificial roughness in a simplified representation, dynamically and geometrically similar to the phenomenon of flow analyzed, and responds to the factors associated with variation and development of the velocity profile. The study establishes its design, configuration, and behavior for different types of roughness.

**Keywords:** Artificial roughness. Physical model with reduced scale. Variation velocity.



## Índice del Estudio

Resumen .....	2
Abstract .....	3
Índice del Estudio .....	4
Lista de Ilustraciones.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Justificación .....	14
1.2. Objetivos .....	14
1.3. Alcance .....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Ecuación de Chèzy .....	16
2.2. Ecuación de Manning .....	17
2.3. Rugosidad artificial - Generalidades .....	18
2.4. Método empírico de diseño propuesto por Pikalov .....	20
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	25
3.1. Identificación de los procesos hidráulicos y de variables principales .....	25
3.2. Modelación hidráulica para el estudio .....	25
3.3. Instrumentación .....	26
3.4. Metodología de experimentación .....	27
3.5. Procesamiento de datos - Regresión Lineal Múltiple .....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
4.1. Aspectos generales de la experimentación.....	32
4.2. Resultados obtenidos en rugosidad tipo A (Doble zig zag) .....	34
4.3. Resultados obtenidos en rugosidad tipo C (Barrotes cortados) .....	37
4.4. Resultados obtenidos en rugosidad tipo E (Barras continuas) .....	40
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45



### Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Perfil esquemático de un canal con rugosidad artificial .....	19
Ilustración 2 Tipo de rugosidad A .....	20
Ilustración 3 Tipo de rugosidad B .....	21
Ilustración 4 Tipo de rugosidad C.....	21
Ilustración 5 Tipo de rugosidad D.....	22
Ilustración 6 Tipo de rugosidad E .....	22
Ilustración 7 Tipos de rugosidad artificial para la experimentación .....	25
Ilustración 8 Canal de implementación de rugosidad .....	26
Ilustración 9 Esquematación de la disposición de las estaciones de registro para la experimentación. ....	27
Ilustración 10 Medición de tiempo de paso con trazadores discretos en las estaciones de registro del canal.....	28
Ilustración 11 Proceso de experimentación con trazador fluido. ....	28
Ilustración 12 Esquema de experimentación en el laboratorio .....	30
Ilustración 13 variación del perfil de velocidad por presencia de elementos de rugosidad .....	32
Ilustración 14 Perfil del flujo en el canal .....	33
Ilustración 15 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal .....	35
Ilustración 16 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo A.....	36
Ilustración 17 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal .....	38
Ilustración 18 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo C .....	39
Ilustración 19 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal .....	41
Ilustración 20 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo E .....	42



**Lista de Ilustraciones**

Tabla 1. Valores de C para diferentes proporciones de  $b/h$ ..... 23

Tabla 2 Altura de rugosidad de los elementos (mm) ..... 26

Tabla 3 Características del canal rectangular del laboratorio ..... 26

Tabla 4 Formato de laboratorio para experimentación ..... 29

Tabla 5. Rango de valores de caudal de experimentación (l/s) ..... 30

Tabla 6 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo A ..... 34

Tabla 7 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo C..... 37

Tabla 8 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo E ..... 40



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Víctor Danilo Saico Bermeo, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de abril de 2019

Víctor Danilo Saico Bermeo

C.I: 010588177-5

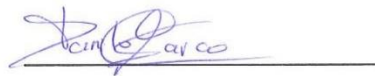


### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Víctor Danilo Saico Bermeo, autor del trabajo de titulación "Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de abril de 2019



Víctor Danilo Saico Bermeo

C.I: 010588177-5





Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Renato Andrés Vivar Orellana, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de abril de 2019

---

Renato Andrés Vivar Orellana

C.I: 010490854-6



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Renato Andrés Vivar Orellana, autor del trabajo de titulación "Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de abril de 2019

---

Renato Andrés Vivar Orellana

C.I: 010490854-6



AGRADECIMIENTO

A Dios, por iluminarnos y permitirnos concluir este trabajo con éxito.

A la Universidad de Cuenca, por abrimos las puertas en diferentes áreas.

A nuestro tutor y lectora, ingeniero Esteban Pacheco e ingeniera Verónica Carrillo por compartimos sus conocimientos y ser unas guías para el futuro.

A nuestros amigos mas cercanos por aportar día a día esta travesía universitaria.

*Renato Andrés, Víctor Danilo*



DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a:

A mis padres, Víctor que con sus exigentes consejos me han permitido estar siempre un paso adelante e inculcarme a ser mejor cada día. Edma por ayudarme, animarme y empujarme en cada circunstancia presente para alcanzar este logro. A ustedes por el ejemplo de amor y trabajo que me demuestran cada día en cualquier actividad.

A mis hermanos, Carolina, Gabriela y Pedro por su paciencia y colaboración.

A Michelle, por toda una trayectoria universitaria y de vida juntos, llena de cariño, apoyo, lecciones. Por hacerme crecer como persona y sobre todo memorables momentos.

A mi familia y amigos que estuvieron en algún momento de este camino académico.

A cada uno de ustedes.

*Víctor Danilo*

A mis padres y hermano, sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible. Fueron siempre todo lo que necesité en cada momento de este camino.

*Renato Andrés*



## *Prefacio*

*En el país es necesario impulsar el desarrollo de varios proyectos dirigidos a mejorar e implementar infraestructura eficiente para abastecimiento de agua, saneamiento ambiental, generación hidroeléctrica, manejo de drenaje urbano, control de inundaciones, entre otros. De manera específica en lo que se refiere a las obras para manejo y control de flujo, se requiere generar conocimiento que permita la validación y adaptación de metodologías de diseño, a través de lo cual se podrá proponer mejores alternativas que optimicen el desempeño hidráulico, así como, los costos de inversión.*

*En este contexto, de manera articulada con el “Programa Integral de Planeación, Manejo y Aprovechamiento del Recurso Hídrico” del Departamento de Ingeniería Civil -DIC-, y con el apoyo del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos -LH&DF-, se presenta el estudio: **“Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico”**, estudio mediante el cual se analiza y valida los métodos y criterios para el diseño de canales con rugosidad artificial para altas velocidades.*

*Estamos seguros de que, la propuesta desarrollada, dará un importante aporte a los procesos de investigación formativa y aplicada en el ámbito de procesos de flujo y estructuras hidráulicas para proyectos en zonas de montaña, y para la formulación de soluciones integrales, en términos funcionalidad y de sostenibilidad ambiental y económica.*

*Esteban A. Pacheco T.*

*Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF  
Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Cuenca*

*Abril de 2019*



## 1.1. Justificación

Debido al incremento de energía cinética que puede adquirir el flujo en obras hidráulicas con altas pendientes, -para sistemas de alcantarillado, obras anexas de proyectos para generación hidroeléctrica, conducciones para proyectos de abastecimiento de agua, descargas en cauces, entre otras-, el control de la velocidad se constituye en un factor crítico de diseño, que requiere especial atención para evitar daños en las obras, así como, otros efectos asociados a la erosión hídrica localizada. De esta manera, para mitigar los efectos que producen las altas velocidades de flujo sobre el revestimiento de un canal, o sobre el material constitutivo del mismo, tradicionalmente se ha planteado como alternativa técnica de fácil aplicación y de bajo costo, el uso elementos físicos de geometría regular que, generan rugosidad artificial y direccionamiento del flujo. Existe escasa información sobre métodos de diseño para reducción de velocidad en canales. Dicha información, ha sido desarrollada recién a partir de la mitad del siglo XX, y generalmente se basa en criterios de velocidades límite y el relacionamiento entre velocidades con el coeficiente de resistencia presente en la ecuación de flujo uniforme de Chèzy.

En este contexto, se hace necesario llevar adelante estudios dirigidos a validar, contrastar y generar nuevas alternativas que permitan aportar al establecimiento de mejores criterios para la optimización y diseño de conductos abiertos -con presencia de altas velocidades de flujo-, y que contemplen consideraciones adicionales como altas pendientes, y variaciones espaciales y/o temporales de caudal y régimen de flujo.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Aportar al conocimiento y aplicación de los métodos para el diseño de conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico de escala reducida.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Sistematizar el estado de conocimiento relacionado con los conceptos de rugosidad artificial.
- Validar métodos y procedimientos de diseño de conductos con rugosidad artificial mediante estudio experimental.
- Identificar criterios de diseño alternativos.



### 1.3. Alcance

El presente trabajo corresponde a un estudio experimental exploratorio, del desempeño hidráulico de rugosidad artificial en canales. El estudio genera información que permite: i) la sistematización y validación de los métodos existentes, ii) el establecimiento de criterios adicionales para la optimización del diseño, y iii) entendimiento, aplicación y desarrollo de conocimiento en experimentación de rugosidad artificial con modelación física. Adicionalmente, el estudio se constituye en un aporte para el desarrollo de documentación de divulgación técnica/científica "Métodos de diseño para conductos con altas velocidades" [Reporte de investigación LH&DF NO. 029] del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

Los resultados y productos derivados del estudio son:

- Modelo físico implementado para estudio de patrones de rugosidad artificial.
- Reporte técnico LH&DF NO. 029 [Reporte de investigación].



## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Los flujos en canales abiertos, normalmente turbulentos, tienen como fuerza motriz a la gravedad, siendo su característica principal, la libertad de flujo en la superficie. Existen varias ecuaciones que, para caracterizar el flujo, consideran parámetros relacionados con el radio hidráulico, pendiente, velocidad, aspectos de forma y de resistencia. Sin embargo, en las ecuaciones disponibles, existe aún, una considerable incertidumbre respecto a la variabilidad y medición de los parámetros que influyen en la capacidad de resistencia al flujo.

Los principales modelos para aproximar la velocidad característica en un conducto abierto (modelos basados en relaciones área - pendiente), se expresan en la forma  $V = C R^x S^y$ , expresión en la cual, R es el radio hidráulico, S la pendiente de la línea de energía en el tramo considerado, y (C) corresponde al factor de resistencia al flujo (Ven Te Chow, 1994). Dentro de estos modelos, se tiene como ecuaciones más representativas a las ecuaciones de Chèzy y Manning.

### 2.1. Ecuación de Chèzy

La ecuación fue desarrollada por el ingeniero francés Antoine Chèzy en 1769, y es considerada como la primera ecuación que describe el flujo uniforme. La ecuación se plantea como:

$$V = C \sqrt{R \times S}$$

*Ecuación 1*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

donde:

V: velocidad media

R: radio Hidráulico

S: pendiente longitudinal

C: factor de resistencia de Chèzy

La ecuación se deduce bajo la suposición de que, la fuerza que resiste al flujo por unidad de área del lecho de la corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad; es decir, esta fuerza es igual a  $KV^2$  donde (K) es una constante de proporcionalidad (Ven Te Chow, 1994). La superficie de contacto del flujo es considerada como el producto del perímetro mojado (P), y la longitud (L) del tramo de canal. Luego la fuerza total que resiste al flujo es igual a  $K V^2 P \times L$ . Además, y como suposición complementaria, se plantea el principio básico de flujo uniforme, que la componente efectiva de la fuerza gravitacional que causa el flujo debe ser igual a la fuerza total de resistencia.

En cuanto al factor de resistencia de esta ecuación, se han realizado muchos intentos para determinar su valor según varias condiciones y tipos de material. Existen algunas ecuaciones para obtener el valor del coeficiente, de entre las cuales se destacan las siguientes:





- Ecuación de Ganguillet & Kutter

$$C = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.61 + \frac{0.00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

*Ecuación 2*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

Esta ecuación, en unidades del Sistema Inglés, data de 1869 y proporciona un valor de (C) en función del radio hidráulico (R), la pendiente longitudinal (S), y el valor de rugosidad (n) de Kutter. Esta fórmula matemática produce resultados satisfactorios y con el tiempo se han desarrollado tablas y gráficas evitando así el uso directo de la fórmula.

- Ecuación de Bazin

$$C = \frac{157.6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}}$$

*Ecuación 3*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

Esta ecuación, en unidades del Sistema de Inglés, fue propuesta por el Ing. H. Bazin, y entrega un valor de (C) en función del radio hidráulico y de un valor de rugosidad (m), según el material de revestimiento (Ven Te Chow, 1994). La ecuación fue planteada con base a ensayos experimentales que incluyen ábacos con resultados de alto grado de confiabilidad.

- Ecuación de Powell

$$C = -42 \log \left( \frac{C}{4R_e} + \frac{\epsilon}{R} \right)$$

*Ecuación 4*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

La ecuación de Powell es una función implícita donde (R) es el radio hidráulico, ( $R_e$ ) el número de Reynolds y ( $\epsilon$ ) es una medida de rugosidad del canal. Esta fórmula fue desarrollada a partir de un número escaso de experimentos en canales lisos y con rugosidad además de partir de la distribución de velocidades teóricas (Ven Te Chow, 1994).

## 2.2. Ecuación de Manning

La ecuación desarrollada en 1889 por Robert Manning, es la más utilizada en la actualidad debido a su simplicidad. Esta relación proporciona la velocidad en función del radio hidráulico, pendiente longitudinal y la rugosidad. La rugosidad n depende del material, alineación del canal, uniformidad de la sección transversal y condiciones de flujo (Ven Te Chow, 1994).



La ecuación se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S}$$

*Ecuación 5*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

donde:

- V: velocidad media en m/s
- n: coeficiente de rugosidad de Manning
- S: pendiente longitudinal o fondo del canal en m/m
- R: radio hidráulico

Entre los coeficientes C de Chèzy y n de Manning, existe una relación importante dada por la ecuación (Ven Te Chow, 1994):

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

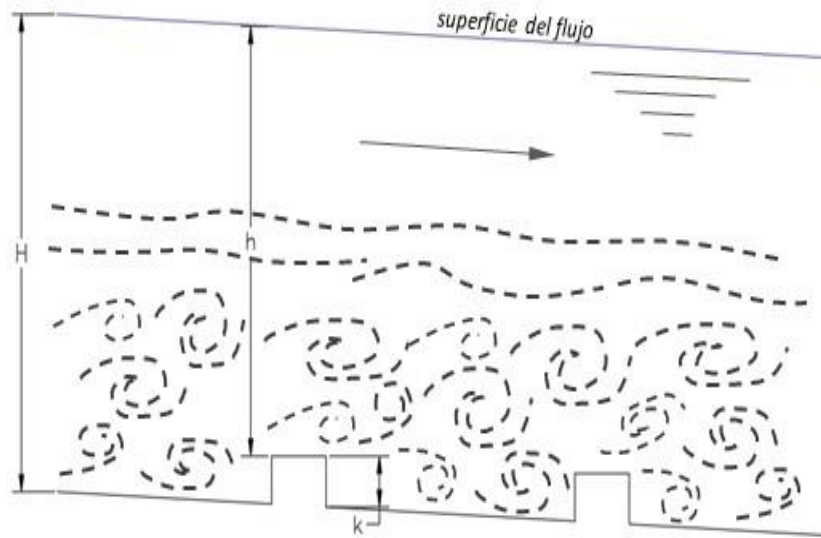
*Ecuación 6*  
*Fuente: Ven Te Chow (1994)*

### 2.3. Rugosidad artificial - Generalidades

La rugosidad artificial se crea mediante elementos de formas geométricas predeterminadas y distribuidas en el perímetro mojado (rugosidad compleja), o sólo sobre una parte (rugosidad inferior o lateral). Tiene como objetivo reducir la velocidad del flujo cuando se alcanzan valores mayores a 4-5 m/s. Su naturaleza se explica por la presencia de una subcapa laminar en la capa límite turbulenta (Ven Te Chow, 1994), y su efecto viene determinado por la relación existente entre la altura de rugosidad y el espesor de la subcapa laminar (Ilustración 1), de tal manera que, la rugosidad generada por los elementos tendría efecto sobre las condiciones del flujo si la altura de rugosidad efectiva es mayor que una fracción definida del espesor de la subcapa laminar.

Para describir la velocidad del flujo en canales con rugosidad artificial, la mayoría de los autores utilizan como referente la ecuación de Chèzy, entendiéndose que el coeficiente de resistencia C de dicha ecuación se encuentra íntimamente vinculado a las condiciones, tanto de material, como de forma, en el fondo y en las paredes del canal.

La incorporación de elementos de rugosidad artificial, tiene una influencia sustancial en la modificación de la velocidad media y del coeficiente de resistencia. Las fórmulas más utilizadas para determinar la configuración de la rugosidad artificial, son las propuestas por F. I. Pikalov y A. Ya. Fal'kovich, expresiones que dan la relación entre la velocidad y el radio hidráulico, y entre el coeficiente de Chèzy y la profundidad promedio.



*Ilustración 1 Perfil esquemático de un canal con rugosidad artificial  
Naturaleza de flujo hidráulicamente rugoso cuando la altura de rugosidad media  $k$  tiene efecto en el flujo*

Los tipos de rugosidad varían según su forma, dimensiones, distancia y distribución espacial en el fondo o en las paredes del canal. Los métodos disponibles se han basado en experimentación realizada en modelos físicos. La mayoría de los investigadores han determinado relaciones entre la altura del flujo sobre el elemento de rugosidad ( $h$ ), la altura del elemento ( $k$ ) y el ancho ( $b$ ) del canal.

P. L. Gordienko encontró que el valor del coeficiente de resistencia  $C$  se mantiene constante hasta relaciones definidas de  $R/k$  (relación entre el radio hidráulico y la altura del elemento de rugosidad artificial), para diferentes formas de rugosidad. Por debajo de dichas relaciones, los el régimen de flujo cambia repentinamente a un régimen altamente turbulento, generándose valores específicos de  $C$  para cada forma de rugosidad considerada.

Así como P. L. Gordienko, otros autores, como Pikalov (1935), realizaron experimentación en modelo físico buscando encontrar una relación entre el coeficiente de resistencia y el radio hidráulico. La relación encontrada fue la siguiente:

$$C = 23 \log \frac{R}{\Delta}$$

*Ecuación 7*  
(Pikalov, 1935)

$$\Delta = a * k$$

donde:

C: coeficiente de Chèzy

R: radio hidráulico en m

$\Delta$ : Proyección de rugosidad asumida en m

a: coeficiente para cada tipo de rugosidad

k: altura del elemento de rugosidad

La Ecuación 7 no considera el efecto de la pendiente, por lo cual Pikalov desarrolló otra metodología en la cual se calcula el coeficiente de resistencia en función de las relaciones  $b/h$  y  $h/k$ , y que para ciertas formas de rugosidad tiene un factor de corrección que depende la pendiente. De esta manera, el coeficiente C no varía solo por el tipo de rugosidad, también dependerá del calado de flujo.

## 2.4. Método empírico de diseño propuesto por Pikalov

El método empírico que se ha utilizado comúnmente en nuestro medio, para el dimensionamiento de canales con altas pendientes (Pikalov, 1935), considera varias configuraciones y tipos de rugosidad asociada, para cada una de las cuales se propone una ecuación como se describe a continuación:

- Tipo A (Doble zigzag)

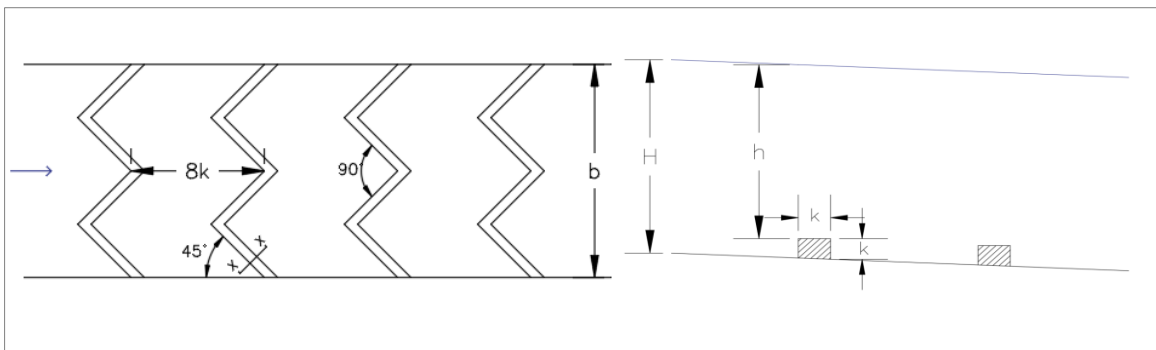


Ilustración 2 Tipo de rugosidad A  
En la parte izquierda se muestra una vista en planta y en la derecha un corte transversal X-X

$$\frac{1000}{C} = 116.1 - 6.1 * \frac{h}{k} - 1.2 * \frac{b}{h}$$

Ecuación 8  
(Pikalov, 1935)

- Tipo B (V invertida)

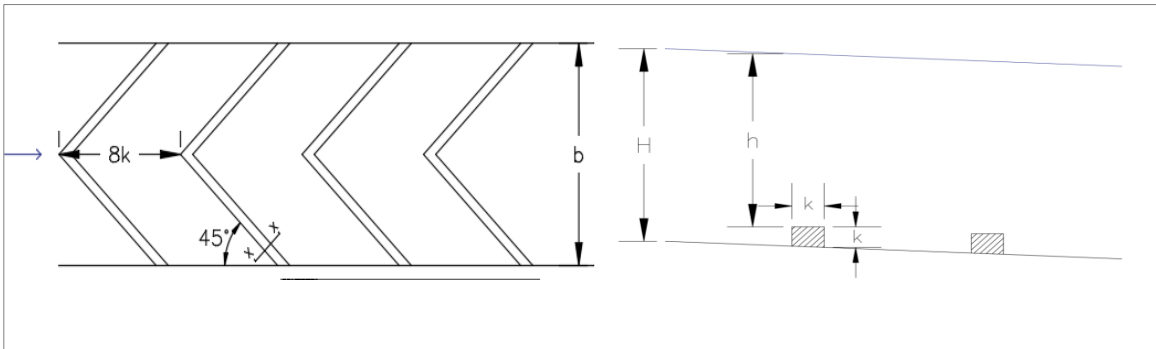


Ilustración 3 Tipo de rugosidad B

En la parte izquierda se muestra una vista en planta y en la derecha un corte transversal X-X

$$\frac{1000}{C} = 85.8 - 3.9 * \frac{h}{k} - 0.8 * \frac{b}{h}$$

Ecuación 9  
(Pikalov, 1935)

- Tipo C (Barroses cortados)

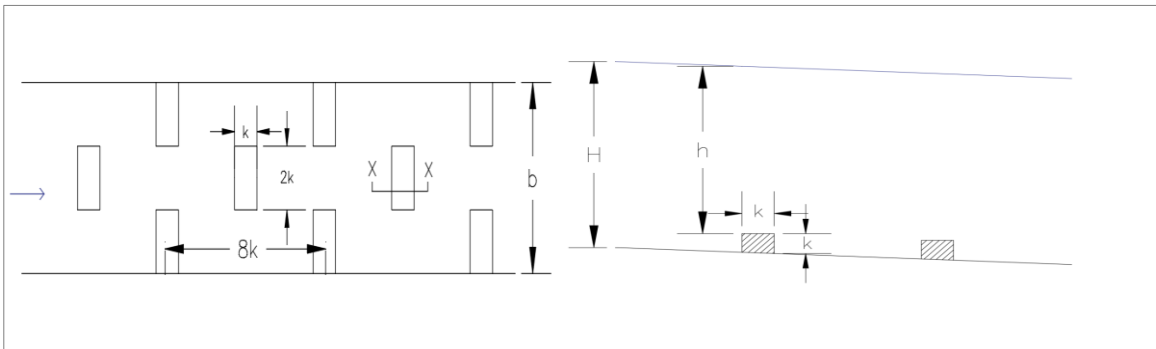


Ilustración 4 Tipo de rugosidad C

Nótese la disposición geométrica de los elementos de rugosidad considerados en este tipo

$$\frac{1000}{C} = 54.2 - 2.1 * \frac{h}{k} - 0.33 * \frac{b}{h}$$

Ecuación 10  
(Pikalov, 1935)

- Tipo D (Dados)

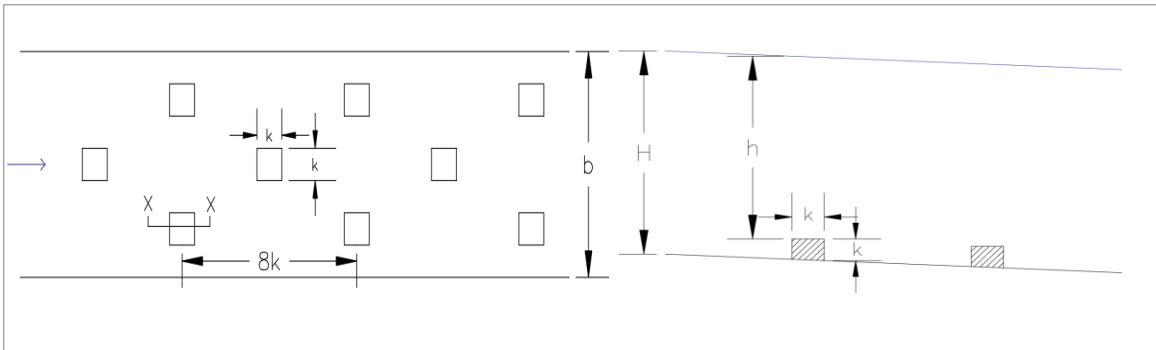


Ilustración 5 Tipo de rugosidad D  
En este tipo los elementos de rugosidad son colocados de manera alternada

$$\frac{1000}{C} = 52 - 5.1 * \frac{h}{k} - 0.8 * \frac{b}{h}$$

Ecuación 11  
(Pikalov, 1935)

- Tipo E (Barras continuas)

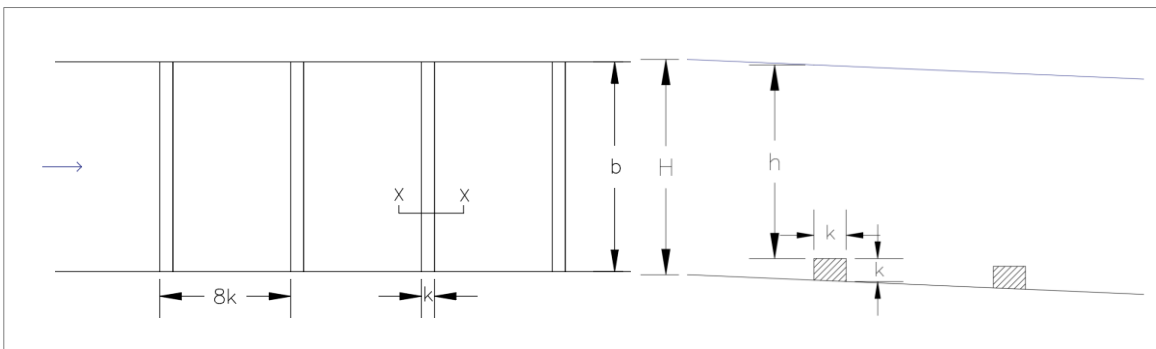


Ilustración 6 Tipo de rugosidad E  
Las barras son colocadas de manera continua en el fondo del canal

$$\frac{1000}{C} = 47.5 - 1.2 * \frac{h}{k} - 0.1 * \frac{b}{h}$$

Ecuación 12  
(Pikalov, 1935)

El empleo de las ecuaciones anteriormente descritas, han permitido a otros autores la generación de tablas. Así, en la Tabla 1, se indica un resumen de los valores calculados para las geometrías de la rugosidad artificial que fueron presentados en el "Manual de Hidráulica de Mostkov" (Mostkov, 1954).



Tabla 1. Valores de C para diferentes proporciones de b/h  
Fuente: (Mostkov, 1954)

Tipo		h/k	Valores de C para diferentes proporciones de b/h											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A		5	11.85	12.00	12.20	12.38	12.56	12.76	12.95	13.16	13.37	13.59	13.87	14.04
		6	12.79	12.97	13.20	13.39	13.61	13.83	14.06	14.31	14.56	14.81	15.08	15.36
		7	13.85	14.08	14.33	14.58	14.84	15.11	15.38	15.67	15.97	16.29	16.61	16.96
sen $\alpha$	Factor corrección	8	15.13	15.40	15.70	16.00	16.31	16.64	16.98	17.33	17.70	18.08	18.48	18.90
		9	16.67	17.01	17.36	17.73	18.12	18.52	18.94	19.38	19.84	20.33	20.83	21.37
0.4—0.06	1.33	10	18.55	18.98	19.42	19.88	20.37	20.88	21.41	21.98	22.57	23.00	23.87	24.57
0.1	1.25	11	20.92	21.46	22.03	22.62	23.26	23.92	24.63	25.38	26.18	27.03	27.93	28.90
mayor a 0.15	1	12	23.98	24.69	25.45	26.25	27.10	28.01	28.99	30.03	31.15	32.36	33.67	35.09
B		3.5	13.90	14.14	14.31	14.47	14.64	14.81						
		4	14.37	14.58	14.71	17.88	15.06	15.24						
sen $\alpha$	Factor corrección	5	15.22	15.43	15.60	15.80	16.00	16.21						
		6	16.16	16.37	16.58	16.81	17.07	17.27						
0.4 - 0.06	1.33	6.5	16.69	16.92	17.12	17.36	17.61	17.86						
0.1	1.11	7	17.24	17.57	17.73	17.99	18.25	18.52						
0.15 - 0.25	1	8	18.48	18.76	19.05	19.34	19.65	19.96						
C		3	20.70	20.58	20.45	20.33	20.16	20.04	19.92	19.72	19.61	19.53	19.42	19.27
		4	21.65	21.54	21.37	21.23	21.05	20.92	20.79	20.62	20.49	20.37	20.20	20.08
		5	22.68	22.52	22.37	22.22	22.08	21.88	21.74	21.55	21.41	21.28	21.10	20.96
		6	23.91	23.64	23.47	23.31	23.09	22.94	22.73	22.57	22.42	22.27	22.08	21.93
		7	25.25	24.88	24.69	24.51	24.33	24.10	23.92	23.70	23.53	23.36	23.15	22.99
		8	26.46	26.25	26.04	25.84	25.58	25.38	25.19	25.00	24.75	24.57	24.33	24.15
D		2.5	26.04	26.20	27.17	27.78	28.41	29.07	29.76	30.49				
		3	27.86	28.49	29.15	29.85	30.58	31.55	32.15	33.00				
		3.5	30.03	30.77	31.55	32.26	33.22	34.13	35.09	36.10				
		4	32.47	33.33	34.25	35.21	36.23	37.31	38.46	39.68				
		5	38.91	40.16	41.49	42.92	44.44	46.08	47.85	49.75				
E		2.5	22.42	22.37	22.32	22.27	22.27	22.22	22.17	22.12	22.10	22.06	22.02	21.98
sen $\alpha$	Factor corrección	3	22.68	22.68	22.62	22.59	22.52	22.52	22.47	22.47	22.37	22.37	22.32	22.30
		4	23.31	23.26	23.26	23.20	23.15	23.13	23.09	23.04	22.99	22.94	22.94	22.90
0,4 - 0,06	1.11	5	23.98	23.92	23.87	23.81	23.81	23.75	23.71	23.64	23.64	23.59	23.53	23.47
0.1	0.9	6	24.63	24.63	24.57	24.51	24.45	24.45	24.38	24.38	24.32	24.27	24.21	24.15
0.2 – 0.25	1.11	7	25.38	25.32	25.25	25.25	25.19	25.13	25.06	25.03	25.00	24.97	24.88	24.85



A partir de la elección del tipo de rugosidad artificial, así como la configuración  $b/h$  y  $h/k$  correspondientes, se extrae un nuevo valor de  $C$  de la Tabla 1. Dicho valor modificado sirve para ser remplazado en la ecuación de Chèzy, obteniéndose un valor de velocidad proyectado para el flujo con rugosidad artificial, mismo que deberá ser menor que el valor teórico correspondiente a la rugosidad natural del coeficiente  $C$  original.

Es importante mencionar que el rango de aplicación de la relación  $b/h$  de la Tabla 1, se encuentra entre 7 y 12. Además, el autor presenta un factor de corrección que depende de la pendiente del canal, dicho factor está presente para los tipos A, B, y E.

La distancia entre los elementos de rugosidad depende de la altura del elemento y deberá variar entre 7 a 8 veces este valor para tener efectos significativos en la reducción de velocidad. Si ésta distancia es considerablemente mayor, la velocidad de flujo entre los elementos aumenta, y se pueden producir vórtices localizados ya que el elemento actuará como un deflector del vector velocidad. Por el contrario, si la distancia es muy corta el flujo comprendido entre dos elementos consecutivos, no formará parte del flujo preferencial, pudiéndose tener condiciones similares al flujo con rugosidad hidráulicamente liso, y a pesar de que se produce cierta disipación de energía, no se provocará el efecto para el que fue diseñado (Krochin, 1982)

Finalmente, se debe indicar que, la experimentación realizada tiene rangos de aplicación (Krochin, 1982), y la mayoría de los autores coinciden en que, para evitar que se llegue a perder estabilidad de flujo, el método planteado se debe aplicar sólo cuando:

$$\frac{h}{k} > 3$$



### 3.1. Identificación de los procesos hidráulicos y de variables principales

El cambio de velocidad debido a la inclusión de un elemento de rugosidad artificial, es el fenómeno relevante que se ha identificado para este estudio, mientras que, las variables contempladas como principales, se clasifican en geométricas y, aquellas propias del flujo sobre un canal rectangular:

- Calado de agua
- Pendiente longitudinal
- Velocidad media del flujo
- Caudal
- Dimensiones del tipo de rugosidad
- Rugosidad del canal

### 3.2. Modelación hidráulica para el estudio

Para la simulación de escenarios de análisis, se planteó una modelación hidráulica de escala reducida con fondo fijo. Las dimensiones del modelo físico para la experimentación se han mantenido constantes, y son el punto de partida para el diseño de las formas de rugosidad artificial propuestas para evaluación de desempeño. La distancia de experimentación de cada uno de los tipos de rugosidad está dividida en 2 tramos. El primero, de sección lisa, y el segundo, con rugosidad artificial. Cada uno de los tramos de experimentación consta de una longitud de 1.50 metros, en consideración de los resultados que fueran obtenidos en estudios preliminares con modelo numérico (Merchán, 2019), a través de lo cual se ha determinado que, el efecto de disminución en la velocidad en un canal con rugosidad artificial se desarrolla a lo largo de una distancia correspondiente a un metro, en la escala de modelación física del presente estudio.

El modelo se ha planteado en consideración de las condiciones disponibles en el canal de experimentación de laboratorio, como el máximo caudal disponible, la altura de las paredes laterales y la variación permitida de pendiente.

Los tipos seleccionados para los elementos de rugosidad del modelo físico, corresponden a los tipos A, C y E, del método propuesto por Pikalov. La ilustración 7, muestra las fotografías concernientes a los modelos de escala reducida que fueron implementados para el estudio.



(a) Doble zigzag - Tipo A

(b) Barras continuas - Tipo E

(c) Barrotes cortados - Tipo C

*Ilustración 7. Tipos de rugosidad artificial para la experimentación*

Los valores de diseño para las alturas de rugosidad de los elementos se muestran en la Tabla 5. Cabe señalar que la obtención de dichos valores se realizó mediante un proceso iterativo, que consistió en establecer que los calados en el flujo se encuentren en un rango aceptable de medición, para lo cual se identificó las pendientes y caudales correspondientes utilizando la ecuación de Manning.

*Tabla 2 Altura de rugosidad de los elementos (mm)*

Tipo	Valor de k
A (doble zig zag)	5.00
C (barrotes cortados)	5.00
E (barras continuas)	7.00

### 3.3. Instrumentación

Los ensayos para la simulación a escala reducida de los efectos de rugosidad artificial se han realizado en el Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, para lo cual se contó con:

- Canal de experimentación rectangular con pendiente ajustable.

*Tabla 3 Características del canal rectangular del laboratorio*

Longitud	L = 12 m
Ancho	b = 0.30 m
Altura del canal	H = 0.45 m
Pendiente positiva máxima de inclinación	S <sub>máx</sub> = 0.025 (2.5%)
Pendiente negativa máxima de inclinación	S <sub>min</sub> = -0.005 (-0.5%)
Caudal máximo de operación	Q = 25 l/s



*Ilustración 8 Canal de implementación de rugosidad*

- Limnímetros mecánicos para medición de la posición de la superficie de agua en estado estable durante los estudios hidráulicos.
- Micro molinete convencional de conteo de revoluciones para medición de velocidad.
- Caudalímetros de precisión para medición de velocidad en zonas específicas.

### 3.4. Metodología de experimentación

Para el estudio experimental, se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Emplazamiento del tipo de rugosidad de estudio en el canal de experimentación de laboratorio.
2. Establecimiento de caudal y condiciones de flujo constantes (Para el estudio se planteó experimentación con 5 valores diferentes de caudal).
3. Registro de valores correspondientes a velocidad, y calado en el flujo.

Para el registro de datos, se estableció 3 estaciones espaciadas como se bosqueja en la Ilustración 9.

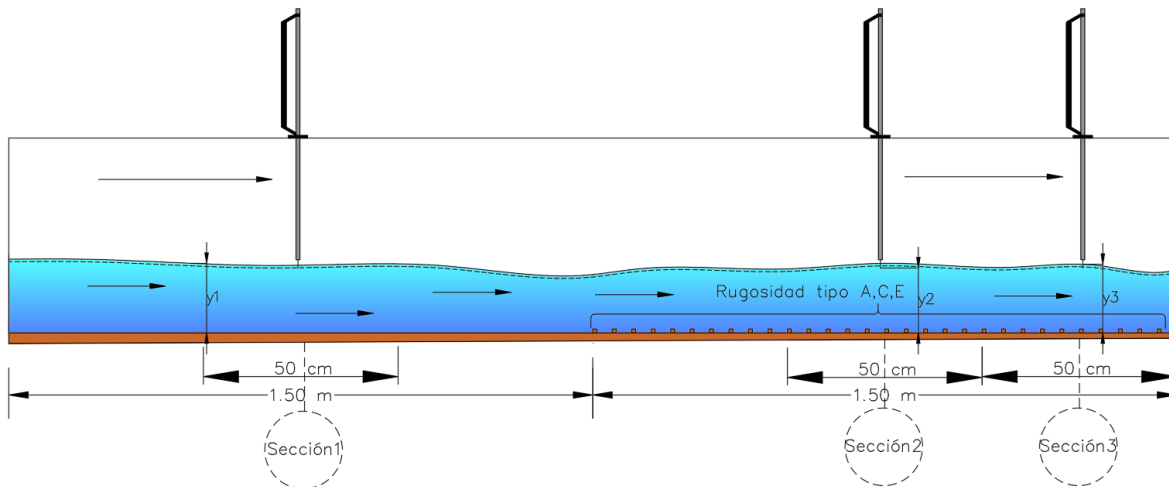


Ilustración 9. Esquemización de la disposición de las estaciones de registro para la experimentación.

En las secciones indicadas se realizó la medición de las variables independientes identificadas para el estudio (calado y velocidad media del flujo), como se describe a continuación:

#### 3.4.1. Método de registro audiovisual

Para el estudio se planteó el registro audiovisual de información durante la medición de tiempos de paso (Ilustración 10 y 11). Para la medición de tiempos de paso, se empleó como trazadores: i) partículas discretas, y ii) rodamina como trazador fluido.

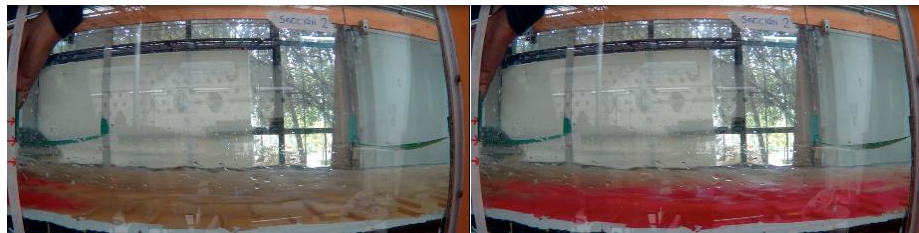


(a) Estación inicial

(b) Partícula en Estación intermedia

(c) Estación final

*Ilustración 10 Medición de tiempo de paso con trazadores discretos en las estaciones de registro del canal.*



(a) Estación inicial

(b) Trazador fluido en recorrido

*Ilustración 11 Proceso de experimentación con trazador fluido.  
Se controla entrada y salida del trazador.*

### 3.4.2. Medición de velocidad

Para la medición de velocidades en las estaciones de registro, se empleó un caudalímetro con precisión de registro de 0.1 m/s y un micro molinete con una precisión de registro de 0.001 m/s. La velocidad en el canal se midió a una altura correspondiente al 60% del calado.

Cabe recalcar que la utilización del caudalímetro fue complementaria, para tener una referencia que permita contrastar los valores de velocidad obtenidos con el micro molinete.

### 3.4.3. Recolección de datos

Para cada uno de los tipos de rugosidad, se planteó un diseño experimental con 6 diferentes pendientes, y con 5 valores de caudal, para cada pendiente.

El formulario de registro experimental para cada una de las pruebas en el laboratorio es el siguiente:



Tabla 4 Formato de laboratorio para experimentación

Tipo de rugosidad			
Pendiente canal			
Caudal de ensayo			
	Calados	Distancia desde inicio	
H1			
H2			
Y1			
Y2			
Y3			
	Velocidad medida en estaciones		
Caudalímetro		m/s	Sección 1
		m/s	Sección 2
		m/s	Sección 3
Micro molinete		m/s	Sección 1
		m/s	Sección 2
		m/s	Sección 3

donde:

H1: calado aguas arriba del vertedero

H2: calado aguas abajo del vertedero

Y1: calado sin rugosidad (sección 1)

Y2: calado sobre la rugosidad (sección 2)

Y3: calado sobre la rugosidad (sección 3)

Para cada tipo de rugosidad se ha procedido con el esquema de experimentación que se indica en la Ilustración 12. En dicho esquema se evidencia ensayos con cinco caudales, a excepción de la pendiente de 0.5%, para la cual, la relación que se proyecta entre el calado y la altura del elemento de rugosidad ( $h/k$ ) es mayor a 20, valor que supera la relación permisible establecida en la literatura técnica.

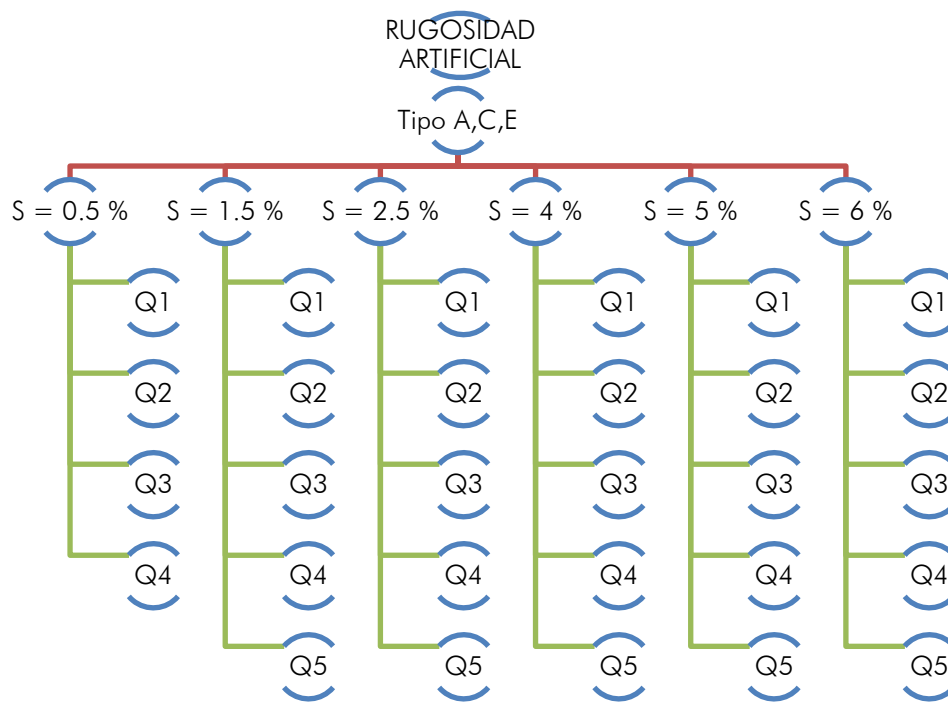


Ilustración 12 Esquema de experimentación en el laboratorio

Los caudales de experimentación se establecieron, para cada ensayo, en los rangos que se indican en la Tabla 4.

Tabla 5. Rango de valores de caudal de experimentación (l/s)

Q1	5 - 9
Q2	9 - 13
Q3	14-17
Q4	19 - 22
Q5	22 - 25

### 3.5. Procesamiento de datos - Regresión Lineal Múltiple

Para el estudio se consideró el modelo de regresión múltiple, mismo que es la extensión a  $k$  variables explicativas del modelo de regresión simple (Abuín, 2007). La estructura del modelo de regresión múltiple contemplada para el estudio corresponde a la expresión:



$$y = f(x_1, \dots, x_k) + E$$

donde:

$y$ : variable explicada, dependiente o respuesta

$x_1, \dots, x_k$ : variables explicativas, regresores o variables independientes

$y = f(x_1, \dots, x_k)$ : componente determinista del modelo

$E$ : error aleatorio que contiene el efecto sobre la función  $y$  de todas las variables distintas de  $x_1, \dots, x_k$

De acuerdo con lo anterior se tiene para el estudio un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + E$$

*Ecuación 13*

Con los resultados obtenidos para el coeficiente ajustado de Chèzy, se realizó un ajuste de regresión lineal múltiple, usando las consideraciones planteadas anteriormente, en donde el valor  $C$  es la variable dependiente de los parámetros  $(h/k)$  y  $(b/h)$ . Los valores de  $\beta_0, \beta_1, \beta_k$ , de la Ecuación 12, corresponden a los valores  $k_1, k_2, k_3$  respectivamente de la ecuación de Pikalov, mientras que las relaciones  $(h/k)$  y  $(b/h)$  corresponden a las variables  $x_1, x_k$ .

Para tener un adecuado ajuste de la ecuación generada por la regresión lineal múltiple, se tomó como índice de confiabilidad el coeficiente de determinación  $R^2$ , generando de esta manera valores del coeficiente que den indicios del comportamiento que presentan los datos. Siendo un buen ajuste los valores cercanos a uno, mientras que se consideran de ajuste de baja confiabilidad o datos dispersos los que tienden a cero o incluso negativos (Abuín, 2007).

### 3.6. Procedimiento de validación

Para la validación del procedimiento planteado, se realizó el análisis comparativo de los valores teóricos calculados a partir del método empírico de diseño explicado en la sección 2.5 y los resultados obtenidos con la experimentación física. El porcentaje de variación entre estos valores, determinará si el método de diseño planteado es aplicable.

#### 4.1. Aspectos generales de la experimentación

La velocidad obtenida mediante los trazadores discretos en las estaciones de registro 2 y 3, han permitido establecer que la velocidad superficial no presentó variaciones significativas, habiéndose obtenido para los tres tipos de rugosidad ensayada, variaciones en centésimas. Por otro lado, la velocidad media disminuye por el efecto de la rugosidad artificial, debido a una modificación en el perfil de distribución de velocidades en la sección como se indica en la Ilustración 13.

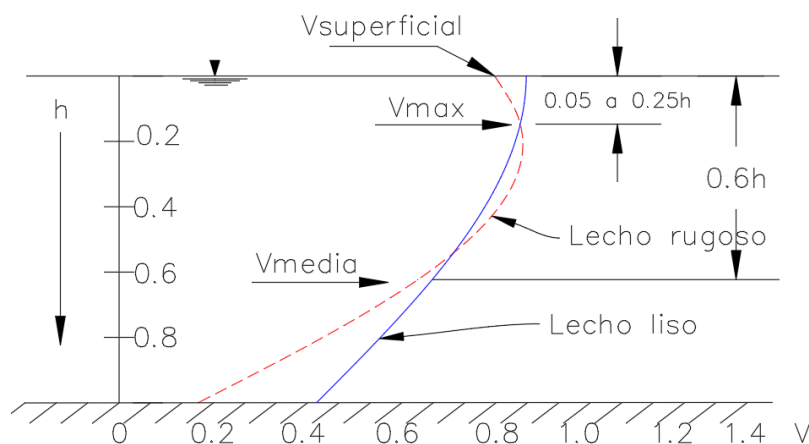
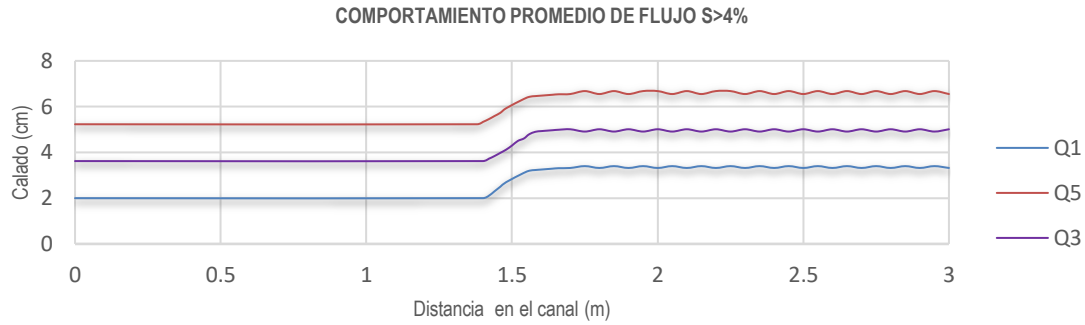


Ilustración 13 variación del perfil de velocidad por presencia de elementos de rugosidad

Para los 3 tipos de rugosidad, se pudo observar un aumento del calado de flujo de alrededor de 1.5 cm, con respecto al tramo de fondo liso, lo cual es coherente con la disminución de velocidad lograda para todos los casos. Esta variación se puede apreciar en la Ilustración 15, que presenta el perfil de flujo para 3 diferentes caudales.





*Ilustración 14 Perfil del flujo en el canal*

En el caso de la menor pendiente analizada ( $S=0.5\%$ ), los efectos de la rugosidad artificial fueron nulos, debido a que la relación  $h/k$  fue mayor a 15 cm, no habiéndose evidenciado efecto de reducción de velocidad para ninguno de los 3 tipos de rugosidad.

En este estudio se ha incluido la pendiente como variable independiente, teniéndose como forma general de la ecuación resultante:

$$C = k1 + k2 \left( \frac{h}{k} \right) + k3 \left( \frac{b}{h} \right) + k4(S) \quad \text{Ecuación 14}$$

donde:

C: coeficiente de Chèzy

( $h/k$ ): relación entre el calado y la altura de rugosidad

( $b/h$ ): razón entre la base y el calado

S: pendiente del fondo del canal

$k1, k2, k3, k4$ : coeficientes de ajuste

En relación con el registro de datos en la experimentación, a continuación, se indica, para cada uno de los tipos de rugosidad, de manera tabular, los valores de ( $h/k$ ), ( $b/h$ ) y la pendiente. Además, se presenta sus correspondientes valores de coeficientes de resistencia que corresponden a la siguiente descripción:

- "C medido" corresponde al coeficiente de resistencia extraído de la Ecuación 1 ( $V = C\sqrt{R \times S}$ ), donde V, R y S fueron valores obtenidos de la experimentación.
- "C calculado" corresponde al valor obtenido mediante la ecuación generada para cada tipo de rugosidad con el análisis de regresión lineal múltiple.
- "C teórico" corresponde a los valores de la Tabla 1 de acuerdo con el procedimiento propuesto por Mostkov.
- La columna denominada "% diferencia", representa la diferencia porcentual entre el valor de "C calculado" y "C teórico".



4.2. Resultados obtenidos en rugosidad tipo A (Doble zig zag)

La ecuación de ajuste obtenida, a través de la regresión lineal, para ese tipo de rugosidad es:

$$C = 24.9 - 0.3139 \left(\frac{h}{k}\right) - 0.4236 \left(\frac{b}{h}\right) - 160.4858(S) \quad \text{Ecuación 15}$$

Tabla 6 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo A

S	h/k	b/h	C medido	C calculado	C teórico	% diferencia
0.06	3.50	17.14	24.27	23.31	-----	-----
	4.62	12.99	23.06	22.89	-----	-----
	6.92	8.67	19.90	22.13	19.03	<b>16.28</b>
	8.94	6.71	21.95	21.67	22.13	<b>2.08</b>
	9.76	6.15	22.20	21.63	24.63	<b>12.19</b>
0.05	3.56	16.85	22.15	24.18	-----	-----
	4.96	12.10	22.08	23.66	-----	-----
	6.28	9.55	21.61	23.11	19.36	<b>19.34</b>
	8.98	6.68	24.07	22.51	22.13	<b>1.71</b>
	10.06	5.96	22.96	22.23	27.09	<b>17.95</b>
0.04	3.38	17.75	28.30	25.48	-----	-----
	4.20	14.29	29.31	25.13	-----	-----
	5.38	11.15	24.61	24.55	18.45	<b>33.08</b>
	8.14	7.37	25.50	23.79	22.58	<b>5.34</b>
	9.42	6.37	23.57	23.57	24.63	<b>4.31</b>
0.025	5.76	10.42	25.05	27.09	18.07	<b>49.88</b>
	7.02	8.55	22.35	26.68	20.84	<b>28.02</b>
	9.64	6.22	26.87	25.82	24.63	<b>4.82</b>
	12.48	4.81	23.98	25.54	34.91	<b>26.85</b>
	12.60	4.76	24.65	25.34	34.91	<b>27.42</b>
0.015	6.12	9.80	29.42	29.86	19.36	<b>54.20</b>
	7.14	8.40	29.70	29.50	20.84	<b>41.55</b>
	9.72	6.22	31.08	30.69	24.63	<b>24.60</b>
	12.74	4.71	31.10	28.31	34.91	<b>18.91</b>
	14.04	4.27	28.16	27.90	34.91	<b>20.09</b>



### 4.2.1. Relación entre el coeficiente de resistencia y caudal para rugosidad tipo A

La Ilustración 16 muestra la variación del coeficiente de Chèzy en función del caudal y pendiente.

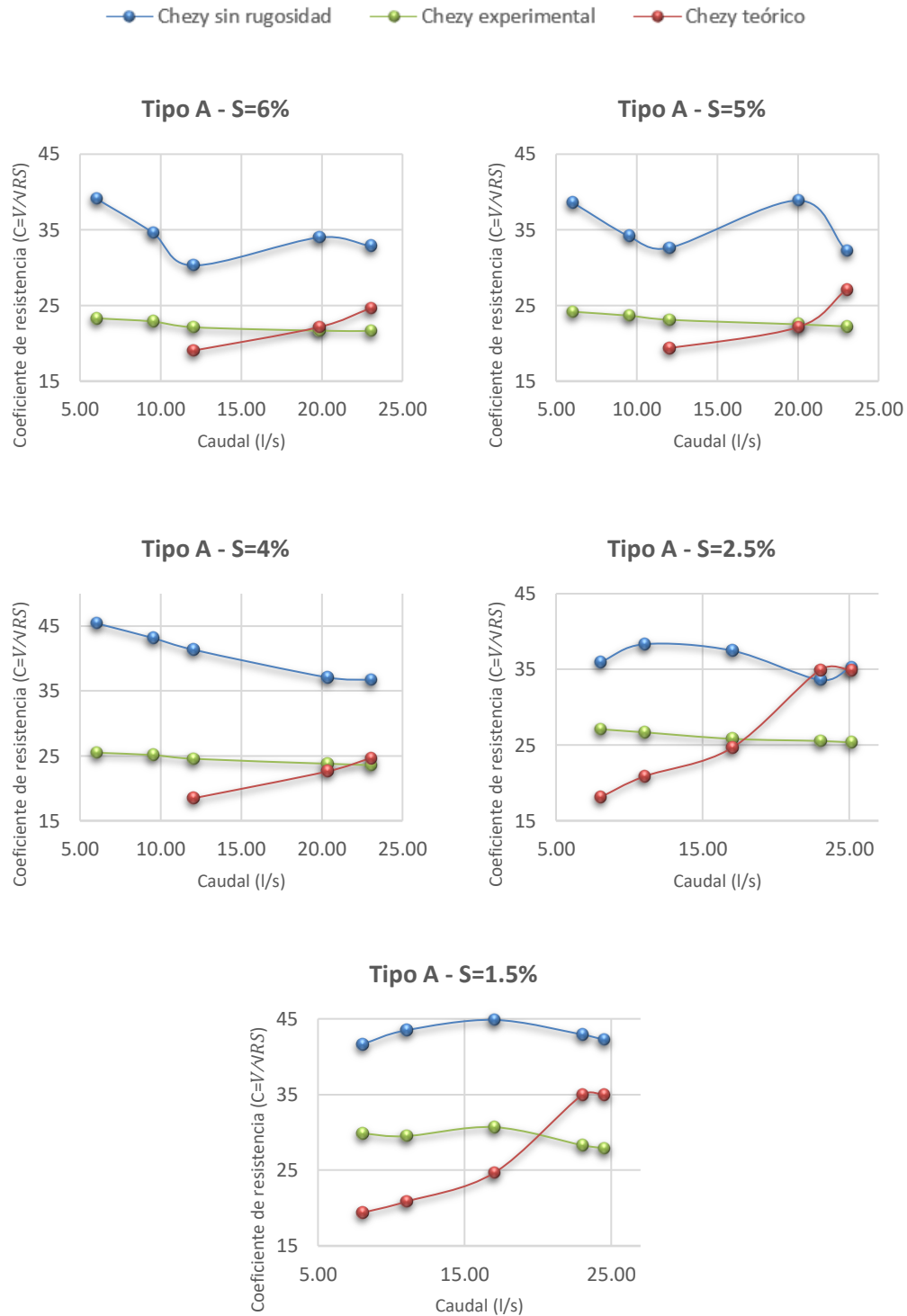


Ilustración 15 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal

### Análisis

- Para la experimentación en rugosidad tipo A (ecuación 15), se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado de 0.58, que se considera adecuado teniendo en cuenta que se usaron 25 datos para este proceso estadístico.
- Se puede observar que existe una reducción del coeficiente de resistencia para todos los casos.
- En cuanto a los valores de C teóricos, se puede apreciar una desviación pronunciada para caudales mayores a 20 l/s, por lo cual se puede decir que para estos casos el método de diseño de Pikalov no es aplicable.
- En el caso de las pendientes 0.015 y 0.025, la diferencia entre los coeficientes de resistencia experimental y teórico, puede explicarse porque el factor de corrección por pendiente usado fue el mismo que para las pendientes entre 0.04 y 0.06.
- En la ilustración 16 se puede observar la reducción de velocidad en el tramo de rugosidad artificial. El porcentaje de esta reducción, para diferentes caudales, varía entre 24% a 40%, considerándose que el modelo es eficiente.

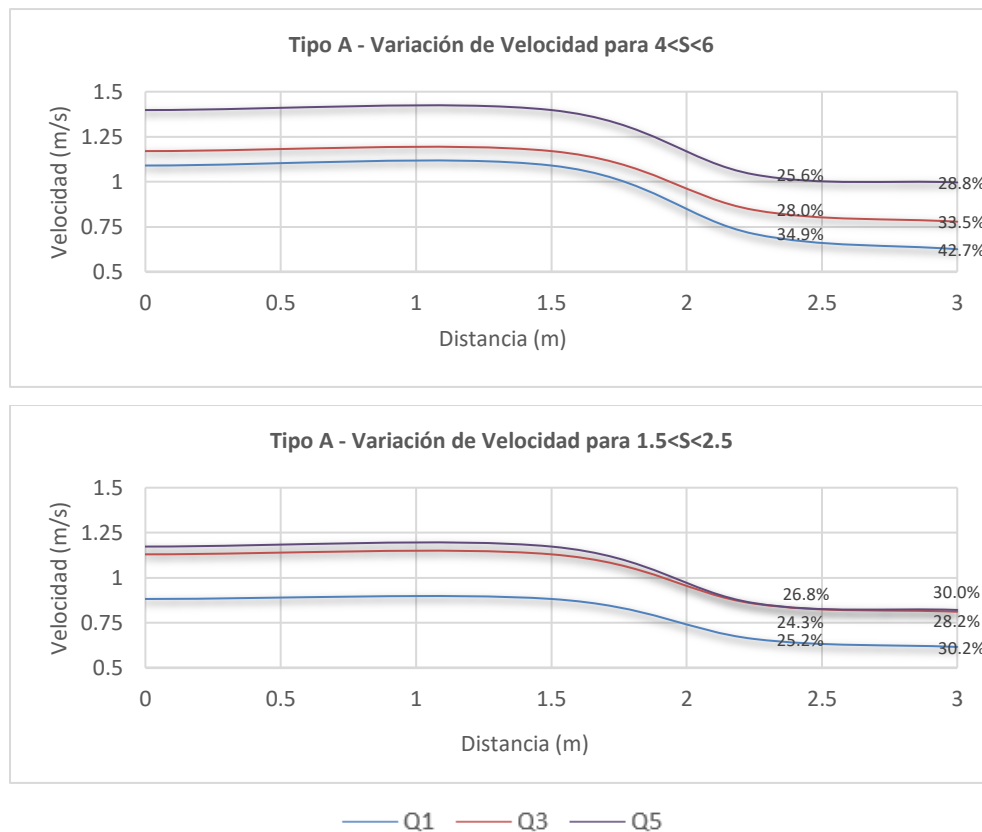


Ilustración 16 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo A



### 4.3. Resultados obtenidos en rugosidad tipo C (Barrotes cortados)

La ecuación de ajuste obtenida, a través de la regresión lineal, para ese tipo de rugosidad es:

$$C = 23.8132 + 0.5025 \left(\frac{h}{k}\right) + 0.2375 \left(\frac{b}{h}\right) - 62.2082(S)$$

*Ecuación 16*

*Tabla 7 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo C*

S	h/k	b/h	C medido	C calculado	C teórico	% diferencia
0.06	4.00	15.00	24.75	25.65	-----	-----
0.06	4.64	12.93	28.68	25.48	-----	-----
0.06	7.24	8.29	28.35	25.69	23.70	<b>8.39</b>
0.06	9.28	6.47	25.69	26.28	25.38	<b>3.55</b>
0.06	11.08	5.42	26.44	26.94	25.58	<b>5.30</b>
0.05	3.52	17.05	26.68	26.52	-----	-----
0.05	4.64	12.93	23.91	26.11	20.08	<b>30.01</b>
0.05	6.22	9.65	28.10	26.12	22.42	<b>16.50</b>
0.05	8.90	6.74	26.93	26.78	25.38	<b>5.50</b>
0.05	11.00	5.45	27.50	27.52	25.58	<b>7.60</b>
0.04	3.34	17.96	25.78	27.27	-----	-----
0.04	3.76	15.96	28.48	27.00	-----	-----
0.04	8.18	7.33	24.09	27.18	25.19	<b>7.88</b>
0.04	9.36	6.41	27.37	27.55	25.38	<b>8.55</b>
0.04	9.68	6.20	26.95	27.66	25.38	<b>8.99</b>
0.03	5.58	10.75	27.46	27.61	21.28	<b>29.77</b>
0.03	7.26	8.26	26.80	27.87	23.70	<b>17.59</b>
0.03	9.64	6.22	26.33	28.58	25.38	<b>12.61</b>
0.03	12.26	4.89	27.02	29.58	25.84	<b>14.47</b>
0.03	12.88	4.66	28.17	29.84	25.84	<b>15.47</b>
0.015	5.70	10.53	27.44	28.25	21.28	<b>32.73</b>
0.015	6.72	8.93	29.40	28.38	22.57	<b>25.73</b>
0.015	9.24	6.22	30.86	29.00	25.38	<b>14.26</b>
0.015	12.70	4.72	34.84	30.38	25.84	<b>17.58</b>
0.015	14.04	4.27	32.16	30.95	25.84	<b>19.77</b>

### 4.3.1. Relación entre el coeficiente de resistencia y caudal para rugosidad tipo C

La Ilustración 16 muestra la variación del coeficiente de Chèzy en función del caudal y pendiente.

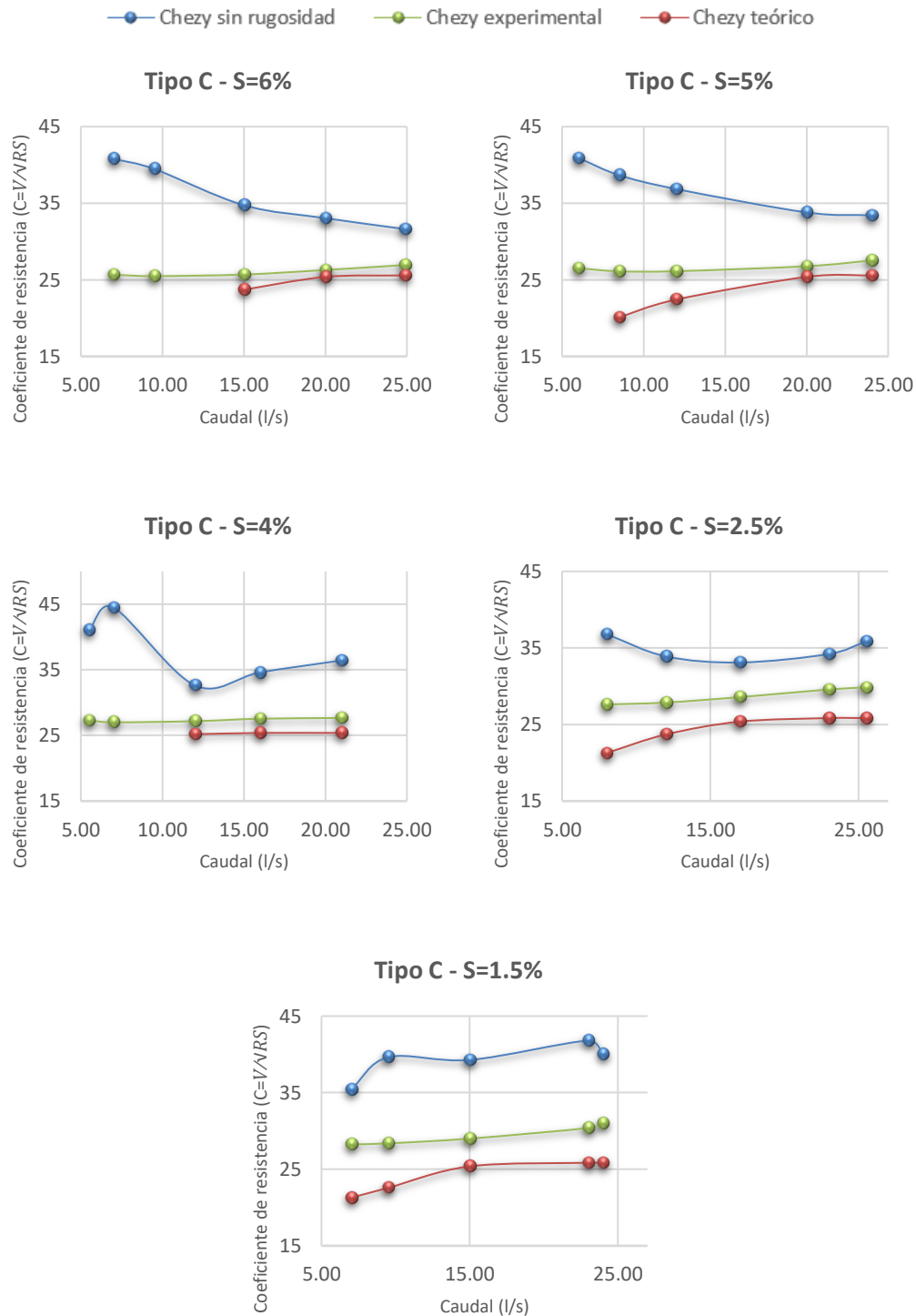


Ilustración 17 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal



### Análisis

- Para la experimentación en rugosidad tipo C (Ecuación 16), se obtuvo un coeficiente de determinación ajustado de 0.30, producto de la dispersión existente entre los valores de la Tabla 7.
- Al igual que el tipo de rugosidad A, se puede observar que existe una reducción del coeficiente de resistencia para todos los casos.
- En la Tabla 7 se puede observar una diferencia porcentual promedio de 18.14%, por lo cual el método de diseño existente es aplicable para la mayoría de los casos y se puede utilizar para diferentes pendientes exceptuando nuevamente  $S=1.5\%$  en el diseño de rugosidad artificial.
- En la Ilustración 18 se puede observar la reducción de velocidad en el tramo de rugosidad artificial. El porcentaje de esta reducción, para diferentes caudales, varía entre 17% a 25%, considerándose también un modelo eficiente.
- De la misma ilustración 18 se puede destacar 2 aspectos principales: el primero el comportamiento similar de los coeficientes de resistencia experimentales y teóricos; y segundo la reducción del valor C para condiciones rugosas y lisas.
- El porcentaje de reducción varía entre 15 a 35%. Como en los otros tipos, existen casos puntuales en los que elementos de rugosidad no son eficientes, pero en términos generales se puede decir que los barrotos cortados cumplen una buena función de reducción de velocidad.

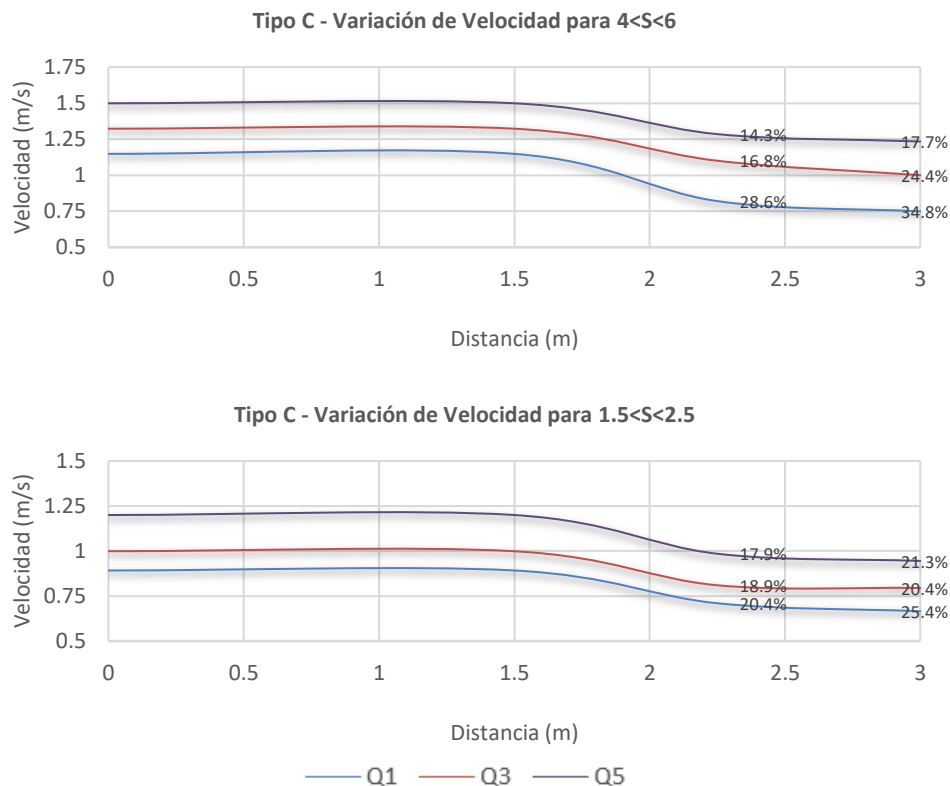


Ilustración 18 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo C



4.4. Resultados obtenidos en rugosidad tipo E (Barras continuas)

Las ecuaciones de ajuste obtenidas, a través de la regresión lineal, para ese tipo de rugosidad son:

Para valores S entre 0.015 y 0.025.

$$C = 23.7819 + 1.4579 \left(\frac{h}{k}\right) + 0.4236 \left(\frac{b}{h}\right) - 36.2202(S) \tag{Ecuación 17}$$

Para valores de S mayores a 0.040.68/0.79.

$$C = 54.5292 - 1.5933 \left(\frac{h}{k}\right) - 1.4626 \left(\frac{b}{h}\right) - 367.126(S) \tag{Ecuación 18}$$

Tabla 8 Valores de experimentación y resultados de coeficiente de resistencia, Tipo E

S	h/k	b/h	C medido	C calculado	C teórico	% diferencia
0.06	3.07	13.95	29.62	29.92	-----	-----
0.06	3.23	13.27	28.75	29.97	-----	-----
0.06	4.64	9.23	31.15	30.91	-----	-----
0.06	6.5	6.59	33.05	32.90	27.14	<b>21.22</b>
0.06	7.2	5.95	35.14	33.74	27.96	<b>20.68</b>
0.05	2.39	17.96	31.56	30.39	-----	-----
0.05	3.09	13.89	30.37	30.30	-----	-----
0.05	4.56	9.4	31.06	31.20	25.52	<b>22.28</b>
0.05	6.17	6.94	32.43	32.88	27.14	<b>21.13</b>
0.05	7.26	5.91	32.99	34.18	27.96	<b>22.25</b>
0.04	1.69	25.42	31.70	31.79	-----	-----
0.04	2.9	14.78	29.70	30.63	-----	-----
0.04	3.84	11.15	31.90	31.00	24.78	<b>25.12</b>
0.04	5.37	7.98	33.50	32.36	26.32	<b>22.95</b>
0.04	6.61	6.48	32.99	33.75	27.14	<b>24.37</b>
0.025	3.76	11.41	25.47	26.67	24.78	<b>7.65</b>
0.025	4.64	9.23	29.73	28.46	25.52	<b>11.52</b>
0.025	6.59	6.51	29.08	29.33	27.14	<b>8.07</b>
0.025	8.89	4.82	28.76	28.14	28.03	<b>0.39</b>
0.025	9.13	4.69	27.50	27.94	28.03	<b>0.30</b>
0.015	4.09	10.49	32.39	31.16	25.46	<b>22.38</b>
0.015	5.06	8.47	31.44	32.57	26.24	<b>24.13</b>
0.015	6.6	6.51	32.98	32.98	27.14	<b>21.54</b>
0.015	9.1	4.71	31.11	31.63	28.03	<b>12.87</b>
0.015	9.89	4.34	31.35	30.92	28.03	<b>10.31</b>





### 4.4.1. Relación entre el coeficiente de resistencia y caudal para rugosidad tipo E

—●— Chezy sin rugosidad    —●— Chezy experimental    —●— Chezy teórico

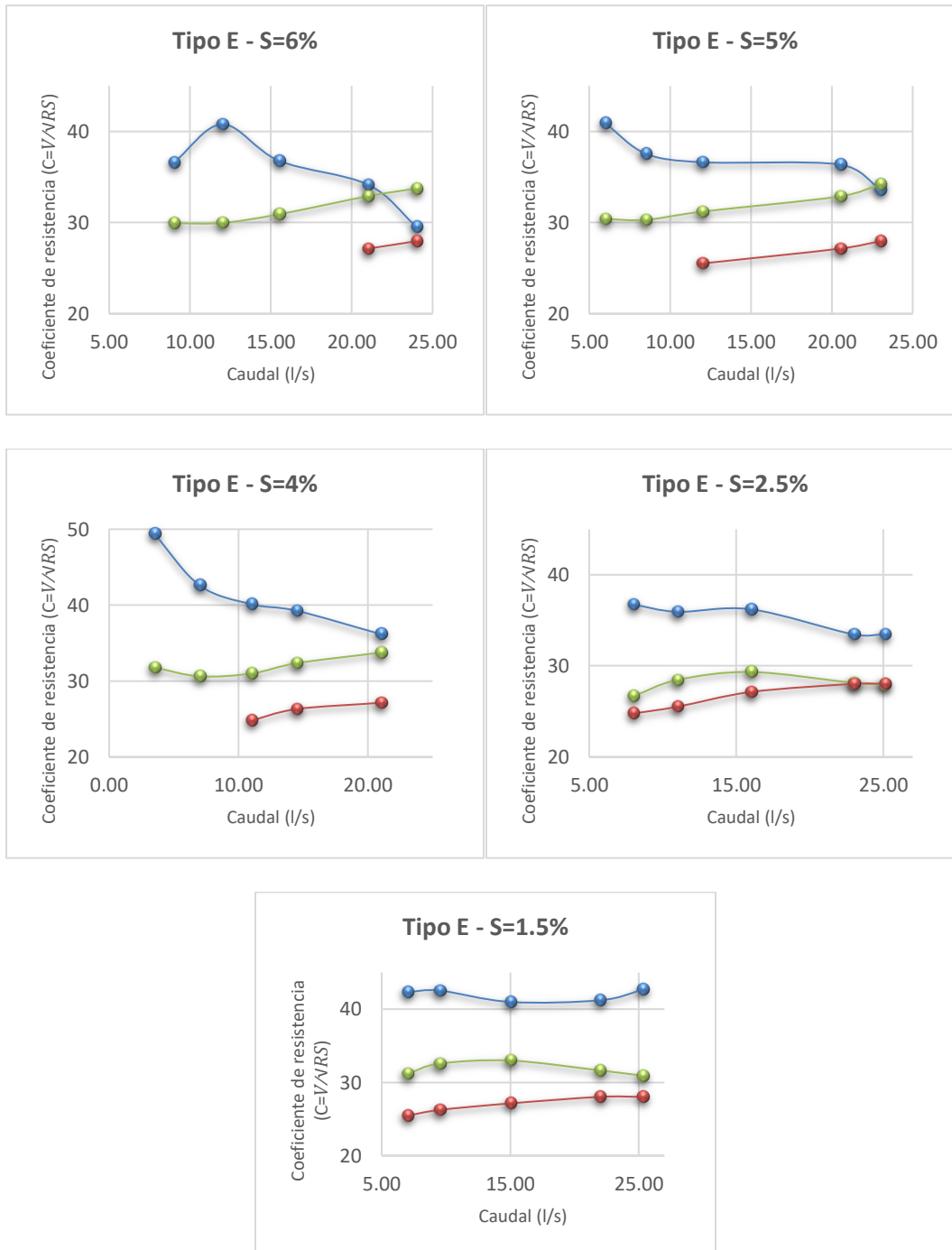


Ilustración 19 Curvas de Coeficiente de resistencia vs Caudal

## Análisis

- Con este tipo de rugosidad, para todas las pendientes y debido a la dispersión de los datos fue imposible obtener una sola ecuación de ajuste. Por lo que se realizaron 2 análisis, uno para las pendientes 4%, 5% y 6% y otro para los valores de 2.5% y 1.5%. Como resultado se obtuvieron 2 ecuaciones (Ecuaciones 17 y 18) con un coeficiente de determinación 0.69 y 0.78 respectivamente.
- En la Ilustración 19, se aprecia para caudales mayores a 20 l/s para pendiente del 6%, el coeficiente de resistencia aumenta y el efecto de rugosidad es nulo.
- Además, se puede observar que para pendientes altas se tiene una dispersión promedio del 17.5% entre el coeficiente de Chèzy teórico y el calculado experimentalmente. Esta diferencia remarca la importancia del factor de corrección, debido a que en la Tabla 1 para el tipo de rugosidad E no presenta factores para pendientes menores al 4%.
- El tipo E presentó un porcentaje de disminución de velocidad bajo en comparación a los demás tipos de rugosidad experimentados, por lo que termina siendo un tipo de rugosidad ineficiente y poco aplicable.
- En la Ilustración 20, la explicación más plausible del rendimiento de 28.15% en reducción de velocidad para pendientes bajas (1.5%-2.5%) y altas (4%-6%), es debido a efectos de las distancias entre las barras transversales. Es decir que mientras más cercanos estén los elementos, el efecto de reducción es menor.

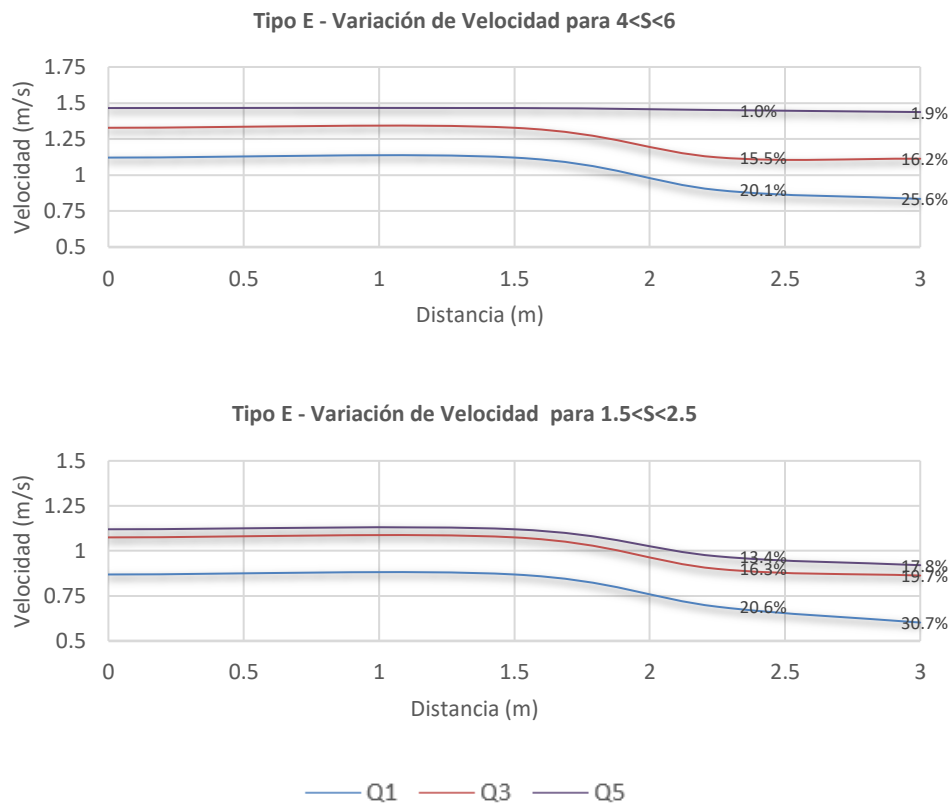


Ilustración 20 Variación de velocidad vs distancia para diferentes caudales. Tipo E



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se ha realizado experimentación física en modelo de escala reducida para validar el efecto de diferentes tipos de rugosidad artificial en el coeficiente de resistencia y por tanto en la velocidad de flujo en canal rectangular de laboratorio.

Para el estudio se ha realizado una revisión de la información disponible, estableciéndose que las fórmulas más utilizadas para determinar la configuración de la rugosidad artificial, son las propuestas por F. I. Pikalov, y A. Ya. Fall'kovich, expresiones que dan la relación entre la velocidad y el radio hidráulico, y entre el coeficiente de Chèzy y la profundidad promedio. Por su parte, Pikalov (1935), además de haber planteado una relación entre el coeficiente de resistencia y el radio hidráulico, desarrolló una metodología en la cual se calcula el coeficiente de resistencia en función de las relaciones  $b/h$  y  $h/k$ , y que para ciertas formas de rugosidad tiene un factor de corrección que depende la pendiente. Como conclusión del estudio se establece que el método desarrollado por Pikalov es el método generalmente empleado para el diseño de canales con rugosidad artificial.

La experimentación en modelo físico, fue dirigida para evaluar el desempeño en reducción de velocidad de elementos artificiales de acuerdo a la metodología propuesta por Pikalov. En este sentido, se ha realizado una validación del método para 3 tipos de rugosidad artificial. Los tipos ensayados fueron:

- Tipo A: Doble zig zag, con ángulo de inclinación de 45 grados
- Tipo C: Barrotes cortados
- Tipo E: Barras continuas.

El estudio experimental se desarrolló en un modelo físico de rugosidad de 1,5m contemplándose 6 pendientes con caudales de flujo en cinco rangos.

La experimentación ha permitido establecer que existe, para todos los tipos de rugosidad, una reducción notable (superior al 10% como valor medio) en la velocidad media.

El estudio establece que la velocidad superficial no presentó disminución significativa, mientras que en todos los casos se presentó un aumento de calado del orden del 60% con respecto al tramo inicial sin rugosidad artificial.

El estudio derivó en ecuaciones empíricas para el coeficiente  $C$  de Chèzy en función del calado de flujo, altura del bloque de rugosidad, ancho del canal y pendiente. Estas ecuaciones se diferencian a las propuestas por Pikalov por la presencia de la pendiente como variable independiente y no como un factor de corrección.

Al comparar los tipos de rugosidad ensayados, se tiene una reducción en el coeficiente de resistencia (Chèzy sin rugosidad y Chèzy experimental) para los tipos A y C de 11.45% y 8.28% respectivamente. Para ambos casos más eficiente que la del tipo E con solo 4.6%. Por otro lado, los valores obtenidos del coeficiente de resistencia para el tipo E fueron los que menor porcentaje de variación presentaron respecto a los valores teóricos.



El factor de corrección por pendiente, que interviene en el cálculo del coeficiente de resistencia, para los tipos A y E no presenta valores menores al 4% (Mostkov, 1954). Además, se pudo observar que los factores de corrección no siguen una tendencia de crecimiento o decrecimiento según la pendiente. La inclusión de la pendiente en el cálculo del coeficiente de resistencia elimina la necesidad del uso de este factor, y permite realizar directamente una estimación del coeficiente de resistencia.

El porcentaje de variación entre el coeficiente de resistencia calculado y teórico en algunos casos tiene que ser tomada como referencia para cada caso en específico dependiendo de la importancia de la obra ya sea por la pendiente, caudal u otras variables que intervienen. Además de complementar con una validación con modelación numérica o física.

La bibliografía no proporciona información de distancias requeridas (longitud de rugosidad) para un determinado grado de reducción de velocidad, por lo cual para el diseño de un canal con rugosidad artificial se debe analizar la variación de velocidad en función de la distancia.

Por todo lo mencionado, se afirma que la teoría existente para el diseño de rugosidad artificial necesita ser desarrollada, principalmente porque subestima la variación que produce el efecto de la pendiente en el cálculo del coeficiente de resistencia.

Los valores bajos de calado que se tuvieron para este estudio fueron el principal obstáculo para la obtención de valores precisos de velocidad ya que no permitió el uso de dispositivos de mejor precisión y tecnología disponibles, por lo cual se recomienda que para este tipo de ensayos se generen calados mayores y de esta manera facilitar las mediciones.

El porcentaje máximo de reducción de velocidad fue del 41% con el tipo A, por lo cual se recomienda que para mayores porcentajes de reducción de velocidad se emplee elemento de disipación de energía.

Para hacer uso de las ecuaciones planteadas luego de la experimentación en este estudio, se debe realizar un análisis de similitud dinámica y física para lograr un equivalente en un tipo de rugosidad de dimensiones mayores.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuín, J. M. (2007). Regresión Lineal Múltiple. *Instituto de Economía y Geografía*, II-IX.
- Krochin, S. (1982). *Diseño Hidráulico. Segunda Edición*.
- Merchán, P. N. (2019). *Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial*. Cuenca.
- Mostkov. (1954). *Manual de Hidráulica*. Moscú.
- Pacheco Tobar, E., & Carrillo, V. (2019). Coeficiente de resistencia. *Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF*.
- Pikalov. (1935). Chutes with artificial roughness. *Tr. VNIIGiM Sel'khozgiz*.
- Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: McGraw-Hill.