

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y  
CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS:**

**Análisis computacional y numérico de la aireación de resaltos  
hidráulicos en el canal de riego Alfaccata, distrito de Puquio,  
Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

**Bach. Juan Carlos GARCIA GUTIERREZ**

ASESOR:

**Msc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**

## RESUMEN

La presente tesis aborda el fenómeno de aireación en los resaltos hidráulicos del canal de riego Alfaccata, ubicado en el distrito de Puquio, Ayacucho. Este estudio es crucial debido a la importancia de la aireación para la salud ecológica y la eficiencia de los sistemas de riego. El objetivo general es evaluar el impacto de la aireación en los resaltos hidráulicos sobre el rendimiento del canal de riego Alfaccata, utilizando modelos computacionales y numéricos. Los objetivos específicos incluyen aplicar técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) para caracterizar los resaltos, desarrollar una rutina en Python para analizar estos datos y evaluar el contenido de aireación en los resaltos hidráulicos. Se emplearon técnicas avanzadas de PDI para capturar imágenes del flujo en los resaltos hidráulicos. Estas imágenes se analizaron con algoritmos especializados para interpretar características clave del flujo de agua y los patrones de aireación. Adicionalmente, se desarrollaron modelos numéricos y rutinas en Python para procesar y analizar los datos obtenidos, permitiendo una modelación precisa de la aireación. El análisis computacional reveló que los métodos de PDI permiten una caracterización detallada de los resaltos hidráulicos. Los modelos numéricos desarrollados en Python demostraron ser eficaces para simular la aireación, mostrando cómo diferentes variables afectan este proceso. Los datos procesados permitieron identificar áreas con aireación insuficiente o excesiva, proporcionando información crucial para mejorar el diseño y la operación del sistema de riego. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de la aireación en la eficiencia y seguridad de los canales de riego.

**Palabras Claves:** Aireación, Canal de riego, Modelación computacional, Modelación numérica, Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), Resaltos hidráulicos.

## ABSTRACT

This thesis deals with the phenomenon of aeration in the hydraulic overtopping of the Alfaccata irrigation canal, located in the district of Puquio, Ayacucho. This study is crucial due to the importance of aeration for the ecological health and efficiency of irrigation systems. The general objective is to evaluate the impact of aeration on the performance of the Alfaccata irrigation canal, using computational and numerical models. The specific objectives include applying Digital Image Processing (DIP) techniques to characterize the shoulders, developing a Python routine to analyze these data, and evaluating the aeration content in the hydraulic shoulders. Advanced PDI techniques were used to capture images of the flow in the hydraulic protrusions. These images were analyzed with specialized algorithms to interpret key water flow characteristics and aeration patterns. Additionally, numerical models and Python routines were developed to process and analyze the data obtained, allowing for accurate modeling of aeration. Computational analysis revealed that PDI methods allow for detailed characterization of hydraulic protrusions. The numerical models developed in Python proved to be effective in simulating aeration, showing how different variables affect this process. The processed data allowed the identification of areas with insufficient or excessive aeration, providing crucial information to improve the design and operation of the irrigation system. The results obtained underline the importance of aeration in the efficiency and safety of irrigation canals.

**Keywords:** Aeration, Irrigation canal, Computational modeling, Numerical modeling, Digital Image Processing (DIP), Hydraulic resins.

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis analiza el fenómeno de aireación en los resaltos hidráulicos del canal de riego Alfaccata, situado en el distrito de Puquio, Ayacucho. Este estudio es esencial para mejorar la salud ecológica y la eficiencia de los sistemas de riego, ya que la aireación en los resaltos hidráulicos desempeña un papel crucial en la oxigenación del agua, lo cual es vital para mantener la calidad del agua. Además, la aireación ayuda a prevenir la erosión de las estructuras del canal y la cavitación, que puede causar daños severos y costosos. Por tanto, comprender y optimizar este proceso no solo mejora el rendimiento del canal de riego, sino que también contribuye a la sostenibilidad del recurso hídrico en la región. El trabajo está diseñado para utilizar técnicas avanzadas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y modelación numérica, proporcionando un análisis detallado del comportamiento del agua y los patrones de aireación en los resaltos hidráulicos. Estas técnicas permiten una visualización precisa y un análisis detallado de los flujos de agua, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados únicamente en simulaciones de geometría y dinámica de fluidos. El PDI ofrece una herramienta poderosa para captar y analizar visualmente el comportamiento del agua, mientras que la modelación numérica permite simular diferentes escenarios y optimizar las condiciones de operación del canal.

El método empleado incluye la captura de imágenes del flujo de agua utilizando PDI y el análisis de estas imágenes con algoritmos especializados que interpretan las características clave del flujo. Además, se desarrolló una rutina en Python para procesar y analizar los datos obtenidos, permitiendo una modelación precisa de la aireación. Este enfoque computacional y numérico proporciona información valiosa para optimizar la gestión del canal, identificando y ajustando áreas con aireación insuficiente o excesiva, mejorando así el diseño y la operación del sistema de riego. La combinación de estas técnicas avanzadas no solo permite una comprensión profunda del fenómeno de aireación, sino que también facilita la implementación de mejoras prácticas en la infraestructura del canal. En resumen, la investigación combina técnicas de PDI y modelación numérica para ofrecer una comprensión profunda y una mejora significativa de la aireación en los resaltos hidráulicos del canal de riego Alfaccata, contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico en la región de Ayacucho. Los resultados obtenidos de este estudio no solo beneficiarán directamente al canal de riego Alfaccata, sino que también podrán ser aplicados a otros sistemas de riego, promoviendo una agricultura más eficiente y sostenible en la región.

## DEDICATORIA

A mi madre Dionicia Gutiérrez Janampa, quien es mi soporte y mi motivación para superarme en los diferentes ámbitos de mi vida.

A mi Hijo Gerard Carlos Maurizio, a quien amo de la única forma que puede amar un padre.

A mis hermanas Dina, Fely, Lucy y Marleny, por siempre brindarme su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

- Al Msc. Ing. Jaime Leonardo Bendezú, por su guía durante el proceso del desarrollo de la presente investigación.
- A los miembros de la comisión el Msc. Ing. Edward León Palacios y Msc. Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez, por sus aportes y recomendaciones en el desarrollo de la presente investigación.
- A mi sobrino Ruder Nahun, por su apoyo en las tomas fotográficas para la presente investigación.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
INTRODUCCIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
GLOSARIO .....	xiv
ACRÓNIMOS .....	xv
SÍMBOLOS .....	xvi
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción del problema.....	17
1.2. Delimitación del problema.....	18
1.2.1. Espacial (geográfica).....	18
1.2.2. Temática y unidad de análisis .....	18
1.3. Formulación del problema.....	18
1.3.1. Problema general.....	18
1.3.2. Problemas específicos .....	18
1.4. Justificación e importancia .....	19
1.4.1. Justificación .....	19
1.4.2. Importancia .....	19
1.5. Limitaciones de la investigación.....	19
1.6. Objetivos.....	20
1.6.1. Objetivo general.....	20
1.6.2. Objetivos específicos .....	20
II. MARCO TEÓRICO.....	21

2.1.	Antecedentes.....	21
2.1.1.	Investigaciones internacionales.....	21
2.1.2.	Investigaciones nacionales .....	22
2.2.	Bases teóricas .....	23
2.2.1.	Flujo en los canales de riego.....	23
2.2.2.	Tipos de Flujo .....	23
2.2.3.	Condición de Flujo .....	24
2.2.4.	Resalto Hidráulico .....	26
2.2.5.	Número de Froude en canales rectangulares.....	27
2.2.6.	Resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales .....	28
2.2.6.1.	Tipos de resalto hidráulico .....	29
2.2.7.	Naturaleza de la visión .....	33
2.2.8.	Procesamiento Digital de Imágenes (PDI).....	36
2.2.9.	Detección de objetos.....	37
2.2.10.	Segmentación de Objetos .....	38
2.2.11.	Color de espectro.....	39
2.2.12.	Métodos Metaheurísticos de Optimización .....	45
2.3.	Marco conceptual .....	47
2.3.1.	Comportamiento Hidráulico .....	47
2.3.2.	Aireación en Resaltos Hidráulicos .....	47
2.3.3.	Canal de Riego .....	47
2.3.4.	Modelación Numérica.....	47
2.3.5.	Modelación Computacional .....	48
2.3.6.	Gestión de Recursos Hídricos.....	48
2.3.7.	Python.....	48
III.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
3.1.	Enfoque .....	49
3.2.	Alcance.....	49
3.3.	Diseño de investigación .....	49



3.4.	Población y muestra .....	49
3.4.1.	Población .....	49
3.4.2.	Muestra .....	50
3.5.	Hipótesis .....	50
3.5.1.	Hipótesis general .....	50
3.5.2.	Hipótesis específicas .....	50
3.6.	Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional .....	50
3.7.	Técnicas e instrumentos .....	52
3.7.1.	Técnicas .....	52
3.7.2.	Instrumento .....	52
3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información .....	52
3.9.	Desarrollo de Trabajo de Tesis .....	52
3.9.1.	Antecedentes de la zona de estudio .....	52
3.9.2.	Ubicación de la zona de estudio .....	53
3.9.2.1.	Ubicación Geográfica .....	53
3.9.2.2.	Ubicación Hidrográfica .....	53
3.9.3.	Datos del Canal de Riego Alfaccata .....	55
3.9.4.	Cálculo del caudal en una sección natural con rugosidad constante ....	57
3.9.5.	Usos y demandas de agua en el canal de riego .....	61
3.9.6.	Balace hídrico .....	64
3.9.7.	Análisis hidrometeorológico .....	66
3.9.8.	Determinación de la demanda .....	69
IV.	RESULTADOS .....	75
4.1.	Análisis e Interpretación de los resultados .....	75
4.1.1.	Análisis computacional por medio de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) .....	75
4.1.2.	Análisis numérico de la modelización de la aireación mediante una rutina en Python .....	80
4.1.3.	Análisis del contenido de aireación en resaltes hidráulicos .....	87
	CONCLUSIONES .....	93

RECOMENDACIONES .....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	95
ANEXOS .....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Profundidad, velocidad en cuatro regímenes de flujo en canales .....	26
<b>Figura 2</b> Resalto hidráulico aguas abajo .....	26
<b>Figura 3</b> Estructura del resalto hidráulico.....	27
<b>Figura 4</b> Canal abierto donde el flujo de agua se define a través del número de Froude. .....	28
<b>Figura 5</b> Desarrollo de un salto hidráulico en un canal horizontal de sección rectangular. .....	29
<b>Figura 6</b> Tipos de resalto hidráulico según su posición.....	30
<b>Figura 7</b> Resalto hidráulico ondulante sobre un fondo áspero. ....	31
<b>Figura 8</b> Resalto hidráulico tenue sobre un fondo áspero. ....	31
<b>Figura 9</b> Resalto hidráulico fluctuante sobre un lecho liso. ....	31
<b>Figura 10</b> Resalto hidráulico fluctuante sobre un lecho liso- Unsch. ....	32
<b>Figura 11</b> Resalto hidráulico en fluctuaciones variables en los remolinos.....	32
<b>Figura 12</b> Resalto hidráulico intenso.....	33
<b>Figura 13</b> Distancias euclidianas entre pares de puntos .....	34
<b>Figura 14</b> Diagrama de bloques de la segmentación de objetos.....	39
<b>Figura 15</b> Espectro electromagnético .....	40
<b>Figura 16</b> Medición de iluminancia y la sensibilidad.....	41
<b>Figura 17</b> Colores que varían en saturación .....	42
<b>Figura 18</b> Intersection over Union (IoU).....	43
<b>Figura 19</b> Detección de objetos usando (YOLO) .....	44
<b>Figura 20</b> Diagrama de flujo de los algoritmos genéticos.....	46
<b>Figura 21</b> Ubicación política .....	54
<b>Figura 22</b> Sección transversal del canal .....	61
<b>Figura 23</b> Volumen. Mensual para TR 12 Hrs (m <sup>3</sup> /mes).....	62
<b>Figura 24</b> Balance Hídrico (m <sup>3</sup> /mes) .....	66
<b>Figura 25</b> Matriz de correlación .....	67
<b>Figura 26</b> Curva Elevación - Precipitación .....	68
<b>Figura 27</b> Precipitación Media vs Precipitación Efectiva (mm).....	73
<b>Figura 28</b> Imagen 1 en escala de grises y bordes .....	76
<b>Figura 29</b> Imagen 2 y 3 en escala de grises y bordes.....	76
<b>Figura 30</b> Imagen 4 en escala de grises y bordes .....	77
<b>Figura 31</b> Imagen 3 con resaltos hidráulicos.....	78
<b>Figura 32</b> Imagen 4 con resaltos hidráulicos.....	79
<b>Figura 33</b> Resultados de la rutina en Python .....	83

<b>Figura 34</b>	Análisis de Precipitación Efectiva, Evapotranspiración y Balance Hídrico...	85
<b>Figura 35</b>	Cálculo de la rutina en la imagen 4 .....	87
<b>Figura 36</b>	Cálculo del Coeficiente de Aireación .....	89
<b>Figura 37</b>	Cálculo del volumen de aire incorporado en el agua por segundo .....	91
<b>Figura 38</b>	Cálculo de la eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos....	92
<b>Figura 39</b>	Imagen de la pendiente del canal .....	115
<b>Figura 40</b>	Imagen del resalto hidráulico formado en el canal .....	115
<b>Figura 41</b>	Imagen de la medición de la velocidad antes del resalto en laboratorio....	116
<b>Figura 42</b>	Imagen de la medición de la velocidad en el resalto en laboratorio .....	116
<b>Figura 43</b>	Imagen de la medición de oxígeno antes del resalto .....	117
<b>Figura 44</b>	Imagen de la medición de oxígeno después del resalto Hidráulico .....	117
<b>Figura 45</b>	Imagen del resalto hidráulico en campo .....	118
<b>Figura 46</b>	Imagen de la medición de la velocidad antes del resalto, en campo.....	118
<b>Figura 47</b>	Imagen del resalto hidráulico formado en la compuerta en campo .....	119
<b>Figura 48</b>	Imagen del canal sin resaltos .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Cuadro de Operacionalización de variables .....	51
<b>Tabla 2</b> Ubicación en coordenadas UTM .....	53
<b>Tabla 3</b> Vías de accesibilidad desde la capital y desde la ciudad de Huamanga - Ayacucho .....	54
<b>Tabla 4</b> Evaluación del Canal de Riego Alfaccata .....	55
<b>Tabla 5</b> Cálculo del caudal del agua en el canal Alfaccata .....	55
<b>Tabla 6</b> Disponibilidad mensual del recurso hídrico l/s y m <sup>3</sup> /mes .....	61
<b>Tabla 7</b> Demanda de agua con precipitación efectiva al 75% .....	63
<b>Tabla 8</b> Volumen mensual demandado y ofertado .....	64
<b>Tabla 9</b> Balance Hídrico calculado .....	65
<b>Tabla 10</b> Estaciones Meteorológicas .....	66
<b>Tabla 11</b> Evapotranspiración Potencial (ET <sub>o</sub> ) por mes .....	69
<b>Tabla 12</b> Precipitación Media (mm) mensual en la estación de Puquio.....	70
<b>Tabla 13</b> Distribución PPE efectiva .....	70
<b>Tabla 14</b> Resumen de la Precipitación Efectiva (PPE) (mm).....	72

## GLOSARIO

<b>Aireación</b>	:	Proceso mediante el cual se mezcla aire con el agua en los flujos rápidos, transformando un estado supercrítico en subcrítico.
<b>Canal de Riego</b>	:	Infraestructura hidráulica diseñada para transportar agua desde fuentes naturales hasta áreas agrícolas para riego
<b>Gestión de Recursos Hídricos</b>	:	Planificación y administración sostenible del agua para equilibrar las necesidades humanas y ecológicas.
<b>Modelación Computacional</b>	:	Técnica avanzada que utiliza la computación para simular y analizar sistemas complejos. Combina algoritmos matemáticos y poder de procesamiento para crear modelos detallados de fenómenos físicos, químicos o biológicos.
<b>Modelación Numérica</b>	:	Técnica utilizada para simular y analizar sistemas complejos mediante algoritmos matemáticos y computacionales
<b>Procesamiento Digital de Imágenes (PDI)</b>	:	Conjunto de técnicas y algoritmos utilizados para analizar y procesar imágenes digitales.

## ACRÓNIMOS

ANA	:	Autoridad Nacional del Agua
CFD		Computational Fluid Dynamics
PDI	:	Procesamiento Digital de Imágenes
UNSCH	:	Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga

## SÍMBOLOS

<b><i>Q</i></b>	:	Caudal
<b><i>A</i></b>	:	Área Hidráulica
<b><i>P</i></b>	:	Perímetro Mojado
<b><i>R</i></b>	:	Radio Hidráulico
<b><i>S</i></b>	:	Pendiente del Canal
<b><i>n</i></b>	:	Rugosidad de Manning
<b><i>v</i></b>		Velocidad del Flujo
<b><i>D</i></b>		Profundidad Hidráulica
<b><i>g</i></b>		Aceleración de la Gravedad



## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción del problema

El estudio del fenómeno de aireación en los resaltos hidráulicos del canal de riego Alfaccata, situado en Puquio, Ayacucho, representa un desafío significativo en la ingeniería hidráulica y ambiental puesto el canal de riego en la zona fue ejecutado recientemente hace unos años, lo que demuestra que es imperativo mejorar continuamente las técnicas y enfoques utilizados en este ámbito para adaptarse a las condiciones y necesidades cambiantes (Rebollo, 2019). La aireación en los resaltos hidráulicos juega un papel crítico en mantener la salud ecológica de los sistemas de agua y en la eficacia de los canales de riego. Dado que el canal de Alfaccata es una infraestructura clave en la región, entender a fondo y optimizar este proceso no solo beneficia la eficiencia del riego sino también contribuye a la sostenibilidad del recurso hídrico en la zona. Esta investigación se centra en comprender y mejorar la aireación en los resaltos hidráulicos, que son cambios abruptos en la profundidad del agua, pasando de un estado de flujo rápido y poco profundo a uno más lento y profundo. Estos resaltos son esenciales en canales de riego como el Alfaccata, impactando directamente en su eficiencia y seguridad.

El enfoque adoptado para este análisis incorpora técnicas avanzadas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), permitiendo un estudio detallado y una mejora significativa de la aireación en los resaltos hidráulicos (Silva et al., 2022). Este proceso es crucial para la salud ecológica del canal y la calidad del agua, ya que facilita la oxigenación necesaria para la vida acuática y previene la acumulación de gases dañinos. A diferencia de métodos convencionales basados en simulaciones de geometría y dinámica de fluidos, este estudio utiliza PDI para una visualización precisa y un análisis del comportamiento del agua y los patrones de aireación, que mediante imágenes se analizara cómo el agua interactúa con el entorno físico del canal y cómo se produce la aireación bajo diversas condiciones.

El método computacional y numérico, basado en PDI, implica la captura de imágenes y su análisis con algoritmos especializados que interpretan características clave del flujo de agua. Los resultados obtenidos proporcionarían información valiosa para la optimización de la gestión del canal, permitiendo a los ingenieros identificar y

ajustar áreas de aireación insuficiente o excesiva, mejorando así el diseño y la operación del sistema de riego.

## **1.2. Delimitación del problema**

### **1.2.1. Espacial (geográfica)**

La investigación se centra específicamente en el Canal de Riego Alfaccata, ubicado en el Distrito de Puquio, en la región de Ayacucho.

### **1.2.2. Temática y unidad de análisis**

La temática central del estudio es la aireación de resaltos hidráulicos, un fenómeno importante en la ingeniería hidráulica, particularmente en relación con los canales de riego.

La unidad de análisis será los resaltos hidráulicos dentro del Canal de Riego Alfaccata. Esto incluye las características físicas y de flujo del agua, como la velocidad, presión, volumen de aireación, y la estructura del resalto hidráulico

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo afecta la aireación en los resaltos hidráulicos al rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en el Distrito de Puquio, Ayacucho, y qué revelan los modelos computacionales y numéricos sobre las dinámicas de estos fenómenos hidráulicos?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cómo pueden las técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes ser aplicadas para caracterizar los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata?
- ¿De qué manera puede una rutina desarrollada en Python procesar y analizar los datos obtenidos del PDI para la modelización de la aireación en los resaltos hidráulicos del Canal de Riego Alfaccata?
- ¿Cómo se pueden evaluar y analizar el contenido de aireación en los resaltos hidráulicos del Canal de Riego Alfaccata utilizando datos procesados?

## **1.4. Justificación e importancia**

### **1.4.1. Justificación**

La aireación en resaltos hidráulicos influye significativamente en la eficiencia del transporte de agua y la integridad estructural de los canales, siendo crucial para prevenir la erosión y daños por cavitación. El uso de un análisis computacional por medio de la aplicación de técnicas avanzadas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y un análisis numérico por medio de programación en Python permitirá un estudio detallado y preciso de estos fenómenos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Los resultados mejorarán no solo el diseño y mantenimiento del canal de riego Alfaccata, sino que también ofrecerán datos aplicables a otros sistemas de riego, contribuyendo así a una agricultura más eficiente y sostenible en Ayacucho.

### **1.4.2. Importancia**

La importancia radica en mejorar la eficiencia de los sistemas de riego y la gestión de recursos hídricos, dado que, al centrarse en la aireación en resaltos hidráulicos, un factor clave en la prevención de la erosión y la protección de infraestructuras, este estudio aporta soluciones innovadoras a desafíos de ingeniería hidráulica. La integración de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes y análisis numérico en Python promete un análisis más profundo y exacto que los métodos convencionales. Además, los hallazgos realizados contribuirán en brindar información sobre cómo mejorar significativamente la sostenibilidad del canal de riego Alfaccata.

## **1.5. Limitaciones de la investigación**

- Se establecerá una resolución máxima para el Procesamiento Digital de Imágenes, equilibrando la precisión del análisis y la capacidad computacional disponible.
- Se restringirá el volumen de datos hidráulicos procesados para mantener un balance entre la profundidad del análisis y la complejidad computacional.
- El modelo desarrollado estará optimizado para funcionar en el Canal de Riego Alfaccata.
- El análisis se centrará en la aireación de los resaltos hidráulicos, sin abarcar otros aspectos relacionados del flujo de agua o de la infraestructura del canal.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo general**

Evaluar el impacto de la aireación en los resaltos hidráulicos sobre el rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en el Distrito de Puquio, Ayacucho, utilizando modelos computacionales y numéricos para analizar las dinámicas de estos fenómenos hidráulicos.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- Aplicar un análisis computacional por medio de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) para caracterizar los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata.
- Crear una rutina en Python para procesar y analizar los datos obtenidos del PDI, enfocada en la modelización de la aireación mediante un análisis numérico.
- Evaluar y analizar el contenido de aireación en resaltos hidráulicos usando los datos procesados.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Investigaciones internacionales

Albuja y Guadalupe (2023) en su investigación *“Análisis experimental de flujo en un resalto hidráulico generado en un canal hidrodinámico”*, tuvieron el objetivo de mejorar la eficiencia en la disipación de energía hidráulica mediante la aireación natural de flujos. La metodología que usaron fueron pruebas experimentales en un canal a superficie libre, utilizando una cámara de alta velocidad para grabar cinco resaltos hidráulicos con diferentes números de Froude. Los videos capturados se analizan con el software Photron Fastcam Viewer y mediante un código de programación en Python con visión artificial. Los resultados obtenidos mostraron que el grado de turbulencia aumenta con la velocidad del flujo y que una cantidad significativa de aire se libera del flujo en forma de salto.

Pedreño (2019) en su investigación *“Análisis numérico y experimental de resaltos hidráulicos”*, tuvo como objetivo la caracterización de resaltos hidráulicos utilizando el Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) para medir velocidades instantáneas y aplicar un modelo de simulación numérica tridimensional CFD en un canal. La metodología incluye la obtención de datos de velocidades en laboratorio, su análisis y validación mediante algoritmos de filtrado, seguido de la simulación numérica con ANSYS CFX, calibrando el modelo con condiciones de flujo medidas en laboratorio. Los resultados indican una alineación cercana entre los datos experimentales y los teóricos en términos de calado conjugado, longitud del resalto y pérdida de energía, validando así la efectividad del modelo CFD y los procedimientos de filtrado utilizados en condiciones de resaltos hidráulicos.

Díaz (2022) en su investigación *“Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada comparando los resultados de un modelo físico con un modelo numérico en Openfoam”*, tuvo como objetivo desarrollar una modelación numérica de flujo Nappe en una rápida escalonada usando OpenFoam, comparando el comportamiento con un modelo físico calibrado. La metodología implica la utilización de un modelo CFD con turbulencia k-omega en OpenFoam, buscando una alternativa a los procesos empíricos de laboratorio. Los resultados muestran que el modelo numérico y el físico presentan comportamientos similares en términos de velocidades y dinámica

del fluido, con errores porcentuales entre 0.67% y 12%. Esto indica que, a pesar de algunas discrepancias, los modelos son consistentes con la teoría.

### **2.1.2. Investigaciones nacionales**

Ames (2022) en su investigación *“Modelación numérica de la capacidad y funcionamiento hidráulico Sifón Invertido - Canal Cimirm”*, tuvo como objetivo determinar la variación en la capacidad y el funcionamiento hidráulico al modelar numéricamente el sifón invertido del canal Cimirm. La metodología empleada es científica, aplicada, descriptiva y con un diseño experimental. La hipótesis sugiere que la capacidad y funcionamiento hidráulico varían significativamente con esta modelación. Los resultados revelan una disminución en la pérdida hidráulica en el sifón, con pérdidas de 0.061m a 0.121m en la entrada y salida, y una suma total de pérdidas de 2.639m. Esto indica que el modelado numérico logra un desempeño hidráulico eficiente con las dimensiones propuestas para las tuberías.

Montalvan (2021) en su investigación *“Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys”*, tuvo como objetivo describir el comportamiento del flujo en el sifón Piura mediante modelación numérica, proporcionando una herramienta eficaz para diseños hidráulicos. Se emplean métodos analíticos, experimental y de modelación numérica para evaluar diversas variables que influyen en el flujo y comportamiento del sifón. Los resultados incluyen la observación de zonas inaccesibles del sifón y la comparación de parámetros como caudal y pérdidas hidráulicas entre los métodos. Se concluye que la modelación numérica valida el diseño hidráulico al comparar los resultados con los métodos analítico y experimental, mejorando la comprensión del comportamiento hidráulico de la estructura.

Jimenez (2019) en su investigación *“Evaluación del funcionamiento hidráulico del aliviadero de la presa Gallito Ciego mediante modelación numérica tridimensional”*, tuvo como objetivo evaluar el comportamiento hidráulico del aliviadero de la Presa Gallito Ciego usando el modelo numérico FLOW-3D. Inicialmente, se actualizan los caudales máximos de avenida en el río Jequetepeque con información reciente, calculando y transitando hidrogramas para distintos periodos de retorno. Se descubrió que el caudal de diseño actual del aliviadero es insuficiente para un periodo de retorno de 2,000 años, correspondiendo en realidad a 776 años. Posteriormente, mediante simulaciones numéricas en FLOW-3D, se constató que la capacidad de descarga del

aliviadero es inadecuada incluso para el caudal de diseño de la fase de proyecto. Esto indica la necesidad de redefinir el caudal de diseño y proponer mejoras estructurales para garantizar la seguridad hidrológica de la presa.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Flujo en los canales de riego**

La gestión del agua en la agricultura depende crucialmente del manejo adecuado del flujo en canales de riego. Estas estructuras, creadas para llevar el agua de su origen a los cultivos, funcionan basándose en principios hidráulicos esenciales, donde mantener un flujo regular y bien controlado es fundamental, y esto se logra ajustando factores como el volumen de agua, la inclinación del canal y la textura de las superficies internas. Un diseño óptimo reduce las pérdidas de agua por infiltración y evaporación, asegurando una distribución eficaz. Por otro lado, el mantenimiento preventivo es clave para evitar bloqueos y desgaste, manteniendo la eficiencia y viabilidad a largo plazo del sistema de riego para cubrir las demandas de la agricultura (Loayza y Meza, 2022).

### **2.2.2. Tipos de Flujo**

#### **2.2.2.1. Flujo permanente y flujo no permanente**

Se describe según la duración, un flujo se considera permanente si mantiene una profundidad uniforme a lo largo de todo el canal. En contraste, se califica como no permanente cuando la profundidad cambia con el tiempo (Loayza y Meza, 2022).

Independientemente del tipo de flujo o la sección del canal, el caudal  $Q$  se determina de la forma siguiente:

$$Q = V \cdot A$$

En esta expresión,  $V$  simboliza la velocidad media del flujo en metros por segundo (m/s), y  $A$  corresponde al área de la sección transversal en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

#### **2.2.2.2. Flujo uniforme y flujo variado**

Se define en función del espacio, y se describe un flujo como uniforme cuando mantiene la misma profundidad en todas las secciones del canal. Asimismo, un flujo

uniforme puede clasificarse tanto como permanente como no permanente (Loayza y Meza, 2022).

**a. Flujo uniforme permanente**

Representa la condición ideal en la hidráulica de canales, dado que la profundidad del flujo permanece constante a lo largo del tiempo establecido.

**b. Flujo uniforme no permanente**

Es necesario que el agua fluya de manera paralela al fondo del canal, una situación que en la práctica resulta imposible de lograr.

De manera similar, el flujo variado se divide en las siguientes categorías:

**Flujo de variación rápida;** se caracteriza por cambios bruscos o repentinos en la profundidad a lo largo de distancias cortas.

**Flujo de variación gradual;** se define por cambios lentos y progresivos en la profundidad a lo largo de distancias reducidas.

**2.2.3. Condición de Flujo**

La comprensión de los estados y comportamientos del flujo en fluidos depende críticamente de los impactos combinados de la viscosidad y la tensión superficial del agua, puesto que un flujo se manifiesta cuando predomina la fuerza viscosa sobre la inercia, evidenciado por un bajo número de Reynolds  $R$ . En contraste, un flujo turbulento emerge cuando la inercia supera la viscosidad, caracterizado por un alto número de Reynolds  $R$ . También se identifica un estado de transición del flujo, que marca la transición del régimen laminar al turbulento, donde es relevante resaltar que, en muchos contextos de ingeniería, los flujos turbulentos uniformes son frecuentemente el foco de estudio (Rebollo, 2019).

$$R = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Donde:

$V$  = velocidad del flujo ( $m/s$ )

$L$  = profundidad hidráulica (m)



$\nu$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

### 2.2.3.1. Regímenes de Flujo

Los cálculos de los diferentes regímenes de flujo están asociados con el impacto de la gravedad, lo que facilita la determinación del número de Froude “F”, que se define de la manera siguiente:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Cuando  $F = 1$ , se tiene  $V = \sqrt{g \cdot D}$  y por consiguiente se determina que el flujo es crítico.

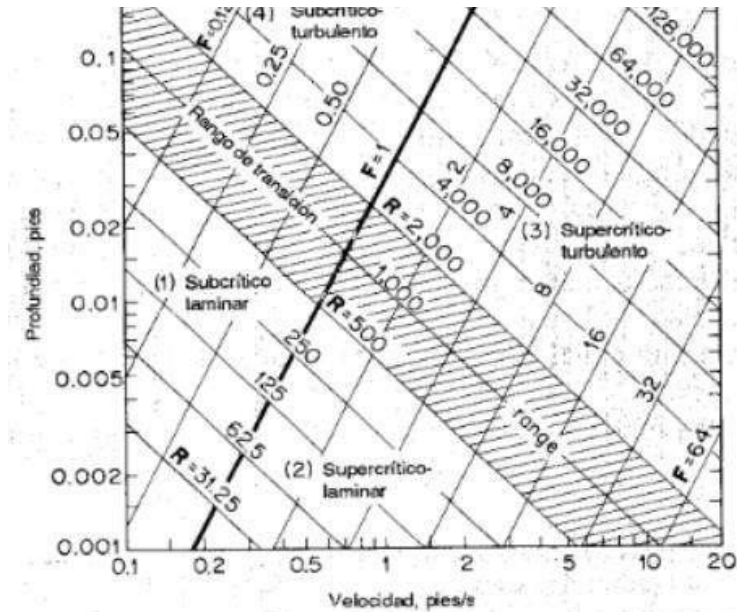
Flujo subcrítico	$F < 1$ o $V < \sqrt{g \cdot D}$
Flujo crítico	$F = 1$ o $V = \sqrt{g \cdot D}$
Flujo supercrítico	$F > 1$ o $V > \sqrt{g \cdot D}$

La combinación de los efectos de gravedad y viscosidad da lugar a cuatro regímenes de flujo distintos:

- a. **Subcrítico – Laminar:** Se caracteriza por un número de Froude “F” menor que uno y un número de Reynolds “R” dentro del rango laminar.
- b. **Supercrítico - Laminar:** Se distingue por un número de Froude “F” mayor que uno, con el número de Reynolds “R” aún en la zona laminar.
- c. **Supercrítico - Turbulento:** Identificado por un número de Froude “F” que excede la unidad y un número de Reynolds “R” en el rango de turbulencia.
- d. **Subcrítico - Turbulento:** Se reconoce por un número de Froude “F” menor que uno, mientras que el número de Reynolds “R” se sitúa en la zona turbulenta.

**Figura 1**

*Profundidad, velocidad en cuatro regímenes de flujo en canales*



*Nota.* Imagen extraída de (Loayza y Meza, 2022).

#### **2.2.4. Resalto Hidráulico**

El resalto hidráulico es uno de los fenómenos más extensamente investigados en la ingeniería hidráulica, tanto desde perspectivas teóricas como experimentales. A lo largo del siglo pasado, numerosos investigadores lo han estudiado detalladamente. Continúa siendo la opción preferida para la disipación de energía debajo de vertederos y desagües, debido a sus características bien conocidas y documentadas (Rojas y Vargas, 2022).

**Figura 2**

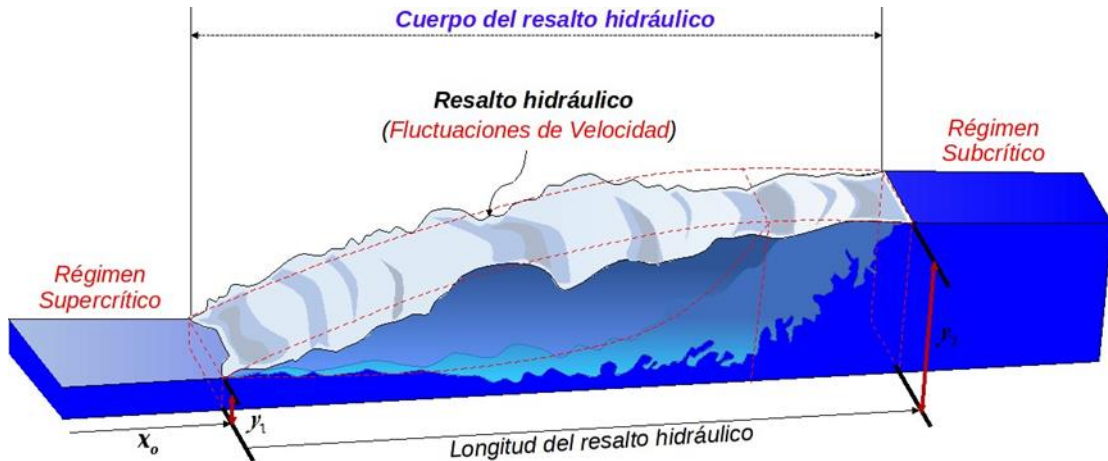
*Resalto hidráulico aguas abajo*



Nota. Obtenido del diario NEWS (2020).

El resalto hidráulico en canales abiertos es resultado de un flujo de variación rápida, donde se produce un cambio notable de un flujo supercrítico a uno subcrítico. Esto generalmente se debe a estructuras que interfieren en el movimiento del flujo.

**Figura 3**  
Estructura del resalto hidráulico



Nota. Obtenido de Rojas y Vargas (2022).

### 2.2.5. Número de Froude en canales rectangulares

En el caso de canales rectangulares, se puede calcular el número de Froude utilizando la siguiente fórmula:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

La velocidad media del flujo se determina mediante la aplicación de:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Así, también se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_r = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{g \cdot y}}$$

Para un canal que posee una sección transversal de forma rectangular, se deduce lo siguiente:

$$F_r = \frac{Q}{B \cdot y \cdot \sqrt{g \cdot y}} = \frac{Q}{B \cdot y \cdot \sqrt{g \cdot y^{1.5}}}$$

Conociendo la descarga  $Q$ , es posible calcular el número de Froude a través de la medición de la altura del nivel del agua.

**Figura 4**

*Canal abierto donde el flujo de agua se define a través del número de Froude.*



*Nota.* Obtenido de Rojas y Vargas (2022).

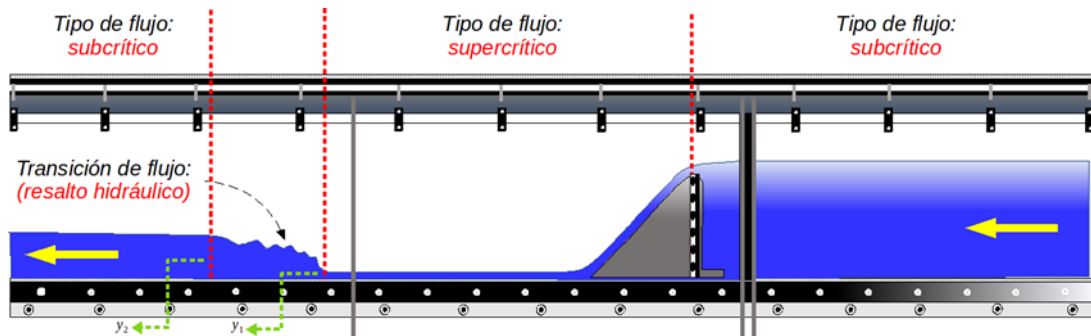
**2.2.6. Resalto hidráulico en canales rectangulares horizontales**

Para un flujo supercrítico en un canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa mediante la resistencia friccional a lo largo del canal, resultando en una reducción de la velocidad y un aumento de la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si se cumplen ciertas condiciones, incluyendo el número de Froude ( $Fr$ ), la profundidad ( $y_1$ ) y la profundidad ( $y_2$ ) aguas abajo, de acuerdo con una ecuación específica (Ortega et al., 2021).

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr^2} - 1 \right)$$

**Figura 5**

Desarrollo de un salto hidráulico en un canal horizontal de sección rectangular.



Nota. Obtenido de Rojas y Vargas (2022).

### 2.2.6.1. Tipos de resalto hidráulico

Ortega et al. (2021) clasifican los diversos tipos de resaltos hidráulicos según su ubicación relativa a la posición normal y al número de Froude, categorizando los distintos tipos de salto hidráulico de la siguiente manera:

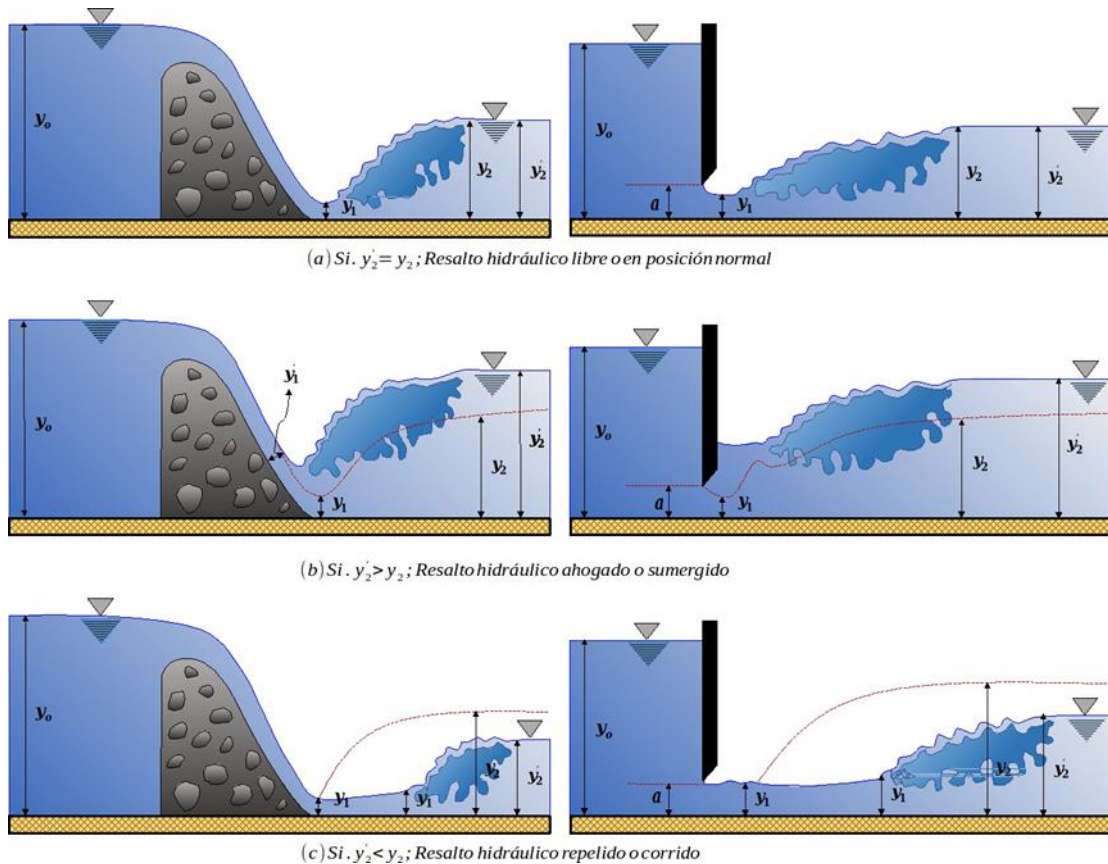
#### a. Resaltos hidráulicos según su posición

Los resaltos hidráulicos pueden tener tres ubicaciones distintas con respecto a su punto de origen (como compuertas, vertederos de rebose y rápidas), basadas en la profundidad  $y_2'$  aguas abajo, la cual está determinada por algún control o una condición específica del flujo.

- **Resalto Hidráulico Libre o en Posición Normal:** Se forma cuando se da la condición de salto normal con  $y_2' = y_2$ , originándose el salto justo al final de la estructura.
- **Resalto Hidráulico Repelido:** Sucede cuando  $y_2' < y_2$ , lo que hace que el salto se desplace aguas abajo hasta una sección con un tirante  $y_1'$ , cuyo conjugado mayor sea igual a  $y_1$  nuevamente.
- **Salto Hidráulico Sumergido o Ahogado:** Se produce cuando  $y_2'$  es mayor que  $y_2$ , lo que provoca que el salto se desplace hacia aguas arriba, resultando en lo que se conoce como salto sumergido.



**Figura 6**  
Tipos de resalto hidráulico según su posición



Nota. Obtenido de Rojas y Vargas (2022).

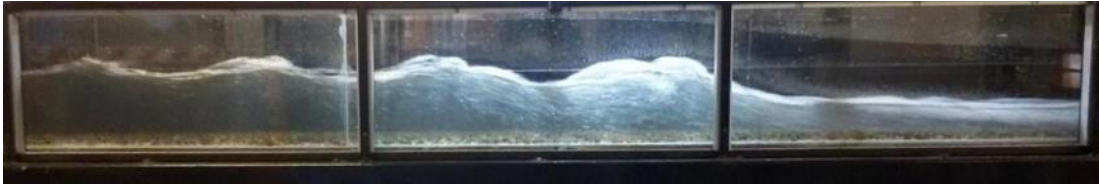
### b. Tipos de resalto según el número de Froude

Los diferentes tipos de resalto hidráulico se clasifican según el número de Froude:

- Para  $Fr < 1$ , el flujo es subcrítico, manteniéndose así y no evolucionando hacia un resalto hidráulico.
- Con un  $Fr = 1$ , el flujo alcanza un estado crítico y no cumple con las condiciones necesarias para la formación de un resalto hidráulico, por lo que no se produce uno.
- Cuando  $1 < Fr \leq 1.7$ , la superficie del agua muestra ondulaciones. La disipación de energía es baja, por debajo del 5%, resultando en un resalto hidráulico ondulante.

### Figura 7

*Resalto hidráulico ondulante sobre un fondo áspero.*



*Nota.* Obtenido de Bahmanpouri y Hubert (2023).

- Cuando el número de Froude está entre 1 y 2.5, se forman remolinos en la superficie del resalto, que luego dan paso a una zona tranquila y estable más abajo. En este caso, la disipación de energía oscila entre el 5% y el 15%, resultando en un resalto hidráulico de intensidad baja.

### Figura 8

*Resalto hidráulico tenue sobre un fondo áspero.*



*Nota.* Obtenido de Bahmanpouri y Hubert (2023).

- Cuando el número de Froude se encuentra entre 2.5 y 4.5, se observa un chorro que emerge desde el fondo y alcanza la superficie, para luego retroceder. Cada oscilación de este chorro genera una onda significativa que puede desplazarse a largas distancias. En este rango, la energía se disipa en un 15% a 45%, dando lugar a un resalto hidráulico fluctuante.

### Figura 9

*Resalto hidráulico fluctuante sobre un lecho liso.*



*Nota.* Obtenido de Bahmanpouri y Hubert (2023).

**Figura 10**

*Resalto hidráulico fluctuante sobre un lecho liso- Unsch.*

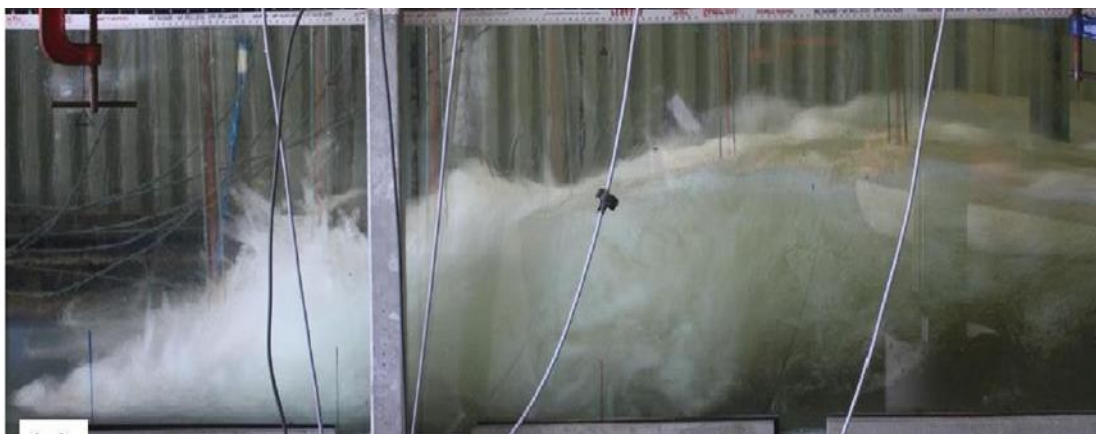


Fuente: Elaboración Propia

- Cuando el número de Froude está en el rango de 4.5 a 9, su acción y ubicación son bastante constantes, mostrando un mejor comportamiento. En este tipo de resalto, la energía disipada varía entre el 45% y el 70%, resultando en un resalto hidráulico estable.

**Figura 11**

*Resalto hidráulico en fluctuaciones variables en los remolinos*



*Nota.* Obtenido de Li et al. (2019)

- Para un número de Froude superior a 9, se caracteriza por altas velocidades y turbulencia, creando ondas y una superficie rugosa aguas



abajo. Esta condición es abrupta y con una elevada disipación de energía, llegando hasta un 85%, dando lugar a un resalto hidráulico intenso.

**Figura 12**  
*Resalto hidráulico intenso*



*Nota.* Obtenido de Li et al. (2019)

### **2.2.7. Naturaleza de la visión**

En la geometría euclidiana, las figuras se analizan en términos de su tamaño y forma, sin considerar su posición, orientación o sentido (Izard et al., 2022). Los principios de la geometría euclidiana proporcionan a los humanos (y a otros animales) una estructura básica para organizar el mundo físico mediante puntos y líneas, lo que permite definir propiedades geométricas como longitud, ángulo y distancia. Estas propiedades son esenciales para navegar en el entorno y clasificar objetos (Ayzenberg y Lourenco, 2020).

Según Carrol y Green (1997), un espacio euclidiano de  $n$  dimensiones es el conjunto de todos los vectores de  $n$  componentes, donde se permiten operaciones de suma de vectores y multiplicación por un escalar. La distancia euclidiana entre dos vectores en este espacio es un número no negativo, definido por la fórmula:

$$\|a' - b'\| = [(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + \dots + (a_{norte} - b_{norte})^2]^{1/2}$$

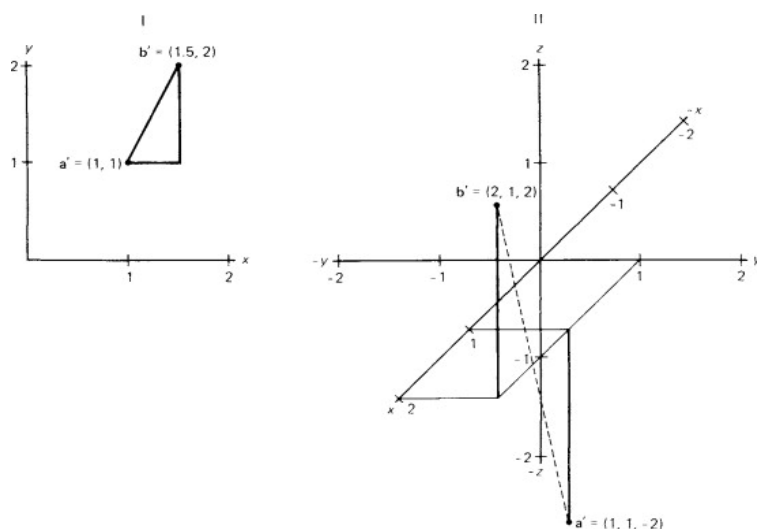
Alternativamente, la distancia euclidiana se puede definir en términos del producto escalar de  $(a - b)$  consigo mismo:

$$\|a' - b'\| = [(a - b)'(a - b)]^{1/2}$$

donde el vector  $(a - b)$  es una diferencia de vectores.

**Figura 13**

*Distancias euclidianas entre pares de puntos*



*Nota.* Tomado de (Carrol and Green, 1997)

### 2.2.7.1. Geometría Projectiva

La geometría proyectiva es una rama bien establecida de las matemáticas que estudia las propiedades de incidencia de puntos, líneas y planos. Cubre temas como la axiomatización de puntos y líneas y su relación de incidencia, el principio de dualidad, los teoremas de Desargues y Fano, conjugados armónicos, proyectividades, polaridades y cónicas (Coxeter, 2003).

Esta rama de la matemática constituye un sistema autónomo y elegante, construido a partir de los conceptos de puntos y rectas junto con una relación de incidencia. Algunos axiomas determinan el comportamiento del sistema (Calderón, 2018).

Según Beutelspacher y Rosenbaum (1998), un subconjunto  $U$  del conjunto de puntos  $P$  se llama lineal si para dos puntos cualesquiera  $P$  y  $Q$  en  $U$ , cada punto de la recta  $PQ$  también está contenido en  $U$ . Si denotamos el conjunto de puntos incidentes con una línea  $g$  por  $(g)$ , entonces  $U$  es lineal si y solo si para dos puntos distintos  $P, Q \in U$  tenemos  $(PQ) \subseteq U$ . La geometría  $P(U)$  con:

$$P(U) = (UL'I)$$

donde  $L'$  es el conjunto de líneas de  $P$  contenidas en  $U$  y  $l'$  es la incidencia inducida, forma un espacio proyectivo posiblemente degenerado.  $U = P(U)$  es un subespacio lineal de  $P$ .

### 2.2.7.2. Plano Proyectivo

Un plano proyectivo es un espacio proyectivo no degenerado donde cualquier par de líneas tiene al menos un punto en común, y una propiedad clave es el principio de dualidad (Beutelspacher y Rosenbaum, 1998). Es un sistema matemático con una relación binaria llamada incidencia entre un conjunto de puntos  $P$  y un conjunto de líneas  $L$ , que cumple tres axiomas: (1) una línea está determinada por dos puntos distintos; (2) dos líneas se cruzan en un punto; y (3) existen cuatro puntos, de los cuales tres no son colineales (Kim y Roush, 2003).

Sea  $D$  cualquier anillo de división. Los módulos de  $D$  tienen propiedades similares a los espacios vectoriales. Sea  $S = D \times D \times D$  como módulo izquierdo,  $P$  el conjunto de submódulos de la forma  $Dx$ ,  $x \in S$ , y  $L$  el conjunto de submódulos de la forma:

$$Dx + Dy ; x, y \in S$$

Donde:

$$x \neq dy ; \forall d \in D.$$

Entonces,  $P$  y  $L$  son esencialmente subespacios unidimensionales y bidimensionales de  $S$ , y la incidencia es la relación  $U \subset V$ , resultando en un plano proyectivo. Elegir  $P = R$  da el plano proyectivo geométrico estándar, caracterizado por la validez del teorema de Desargues. Un anillo ternario (o grupoide) es un conjunto  $R$  con una operación  $R \times R \times R \rightarrow R$  denotada  $x \circ m * b$ . Todo plano proyectivo se puede realizar con  $P$  el conjunto  $R \times R \cup R \cup \{\infty\}$ , donde  $R \times R$  se considera un plano para el anillo ternario, y  $R \cup \{\infty\}$  los puntos de una recta en el infinito.

### 2.2.7.3. Comprensión y Análisis del Entorno

La comprensión y análisis del entorno se realiza en varios niveles. Inicialmente, se examinan características primarias como forma, magnitud y diferencias de profundidad de los objetos. En un nivel intermedio, se enfocan en la consistencia y vínculo de los datos a lo largo del tiempo, utilizando filtros para monitorear, discernir y evaluar parámetros dinámicos, y así estimar la ubicación de los objetos relevantes.

En el nivel más avanzado, se emplean atributos que combinan aspectos espaciales y temporales para adquirir conocimientos, elaborar modelos, clasificar y anticipar el comportamiento de los obstáculos. Las técnicas para la detección de obstáculos en ambientes viales varían significativamente, desde principios mecánicos hasta sistemas ópticos de escaneo sólido por etapas, con distintos niveles de costo y complejidad computacional (Warren, 2019).

### 2.2.8. *Procesamiento Digital de Imágenes (PDI)*

En términos generales, se refiere al conjunto de técnicas y procesos utilizados para descubrir o destacar información contenida en una imagen, utilizando principalmente un ordenador.

Según Warthon y De Paz (2021) el PDI esta constituido de la siguiente forma:

- **Espacio de Color:** Es un método de representación que permite especificar, crear o visualizar cualquier color. La definición numérica de un color se realiza mediante tres valores (luminancias) que describen el color tanto cualitativa como cuantitativamente.
- **Espacio de Color HSV:** Este espacio de color (Hue, Saturation and Value) es una variante del espacio HSI (Hue, Saturation, Intensity), basado en cómo los humanos percibimos los colores. Caracteriza el color en términos de tono (hue), saturación (saturation) e intensidad (intensity), aspectos útiles para la segmentación de imágenes en base al tono, mostrando mayor invariancia a la iluminación.

Las fórmulas más comunes para la transformación del espacio de color RGB (Red, Green, Blue) a HSI están definidas por ecuaciones donde H representa el tono, I la intensidad, y R, G, B son los componentes rojo, verde y azul, respectivamente, mientras que  $\alpha$  es un ángulo que depende de la relación entre G y B.

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$
$$H = \frac{\alpha - \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(R - I)}{G - B}\right)}{2\pi}$$

Si un color presenta componentes iguales de verde y azul (G=B), entonces el tono se establece igual a uno (H=1).

$$S = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - 2RG - RB - BG}$$

(Warthon y De Paz, 2021)

La técnica de transformación de Gris a Binaria se basa en la ecuación que se muestra a continuación. Aquí, IBIN representa la imagen binaria y IGris es la imagen en escala de grises, con Umbral siendo el valor numérico utilizado para la transformación.

$$I_{BIN} = \begin{cases} 1, & I_{Gris} \geq Umbral \\ 0, & I_{Gris} < Umbral \end{cases}$$

Esta metodología implica elegir un umbral óptimo para convertir una imagen a formato binario, lo cual se describe matemáticamente en las siguientes ecuaciones. Para una imagen dada, L representa el nivel de intensidad y T el umbral deseado, mientras que w1 y w2 son las desviaciones estándar,  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son las medias, y  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son las varianzas.

$$w_1(t) = \sum_{z=1}^T P(z)$$

$$w_2(t) = \sum_{z=T+1}^T P(z)$$

### 2.2.9. Detección de objetos

La detección de objetos es una tecnología de visión computarizada que identifica y localiza entidades visuales en imágenes o videos. Utiliza algoritmos y modelos de aprendizaje profundo para reconocer diferentes objetos, etiquetarlos con categorías específicas y determinar su ubicación con precisión. Se puede clasificar de la siguiente manera:

### **2.2.9.1. Visión Orientada a la Identificación de Objetos**

Existen dos variantes principales en el reconocimiento dentro de la visión computarizada:

- a. Detección de objetos específicos:** Identificación y localización de un objeto particular en la imagen.
  
- b. Reconocimiento de instancias:** Identificación de varias instancias de una categoría general, clasificando los objetos en diferentes grupos. Por ejemplo, diferenciar entre marcas y modelos de vehículos y agruparlos bajo la categoría general de “autos”. Este proceso se basa en la asignación de clases a los objetos, realizada por un clasificador (Munoz, 2006).

### **2.2.9.2. Reconocimiento de Patrones**

Una característica representa la base fundamental para describir objetos en imágenes. Estos objetos, definidos por regiones en imágenes segmentadas, se agrupan según atributos comunes como intensidad, color, esquinas y textura, entre otros. Estas características se expresan numéricamente para facilitar la descripción estadística de los objetos. Cada objeto, caracterizado por sus atributos, forma un patrón representado por un vector de características  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , y el conjunto total de patrones posibles constituye el espacio de características. Aunque los clasificadores no reconocen directamente objetos, sí identifican patrones (Munoz, 2006).

### **2.2.9.3. Detección de Cambios o Secuencias de Objetos**

La mayoría de las estrategias o algoritmos para el seguimiento en contextos dinámicos se basan en identificar variaciones a lo largo de una serie de imágenes. En términos simples, el seguimiento consiste en predecir la trayectoria de un objeto en el plano de la imagen a medida que se desplaza por el entorno. Para ello, el mecanismo de seguimiento asigna identificadores constantes al objeto o a los objetos a lo largo de la secuencia de imágenes. Los desafíos asociados con el seguimiento incluyen movimientos bruscos, cambios en el aspecto visual de los patrones de la escena o del propio objeto, y la ocultación parcial entre objetos (Munoz, 2006).

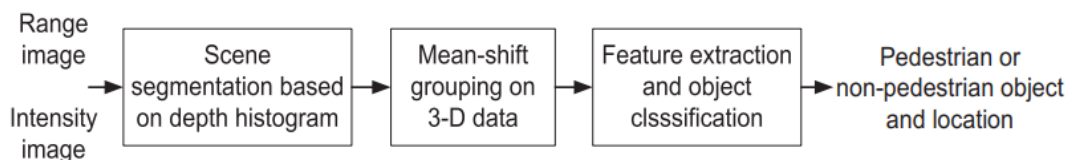
### **2.2.10. Segmentación de Objetos**

Los métodos de segmentación de imágenes se basan en características de bajo nivel como el color y la textura. Por ejemplo, Gould et al. (2009) propusieron un sistema de clasificación de objetos basado en la segmentación de imágenes en múltiples clases, etiquetando los píxeles como clases de fondo o de primer plano y luego clasificando las regiones de primer plano como automóviles, peatones u otros. Leibe et al. (2008) sugirieron que la segmentación y el reconocimiento de imágenes son procesos interrelacionados y que el conocimiento del reconocimiento de objetos debería guiar el proceso de segmentación.

Con los avances recientes en cámaras 3D, se han utilizado imágenes de alcance para la segmentación y reconocimiento de objetos. En comparación con las imágenes en color, las imágenes de rango son menos sensibles a cambios en la iluminación ambiental, el color o la textura del objeto. Los algoritmos existentes para la segmentación de imágenes de rango se centran principalmente en segmentar superficies planas o superficies curvas regulares (Varadarajan y Vincze, 2011).

#### **Figura 14**

*Diagrama de bloques de la segmentación de objetos*



*Nota.* Tomado de (Wei et al., 2014)

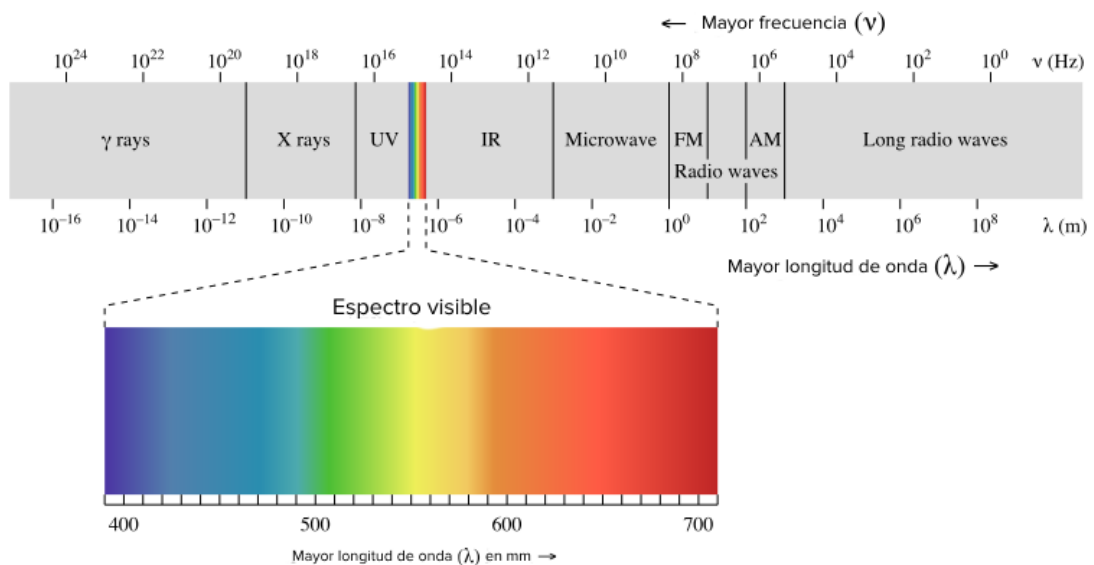
El principio de estos algoritmos es dividir la imagen en regiones cerradas que tienen funciones de superficie similares. Harati y colaboradores propusieron una segmentación basada en bordes para imágenes de rango. En su algoritmo, se calculan dos imágenes de ángulo de rumbo (BA) a partir de imágenes de rango para las direcciones vertical y horizontal, y los bordes de estas imágenes BA se detectan utilizando el operador de Sobel. La segmentación se consigue al etiquetar el mapa de bordes combinado (Harati et al., 2007).

#### **2.2.11. Color de espectro**

### 2.2.11.1. Iluminancia (intensidad lumínica)

La iluminancia es una forma particular de energía que se desplaza o propaga no a través de un conductor, como sucede con la energía eléctrica o mecánica, sino mediante radiaciones. Estas radiaciones son perturbaciones periódicas del estado electromagnético del espacio, lo que define a la iluminancia como “energía radiante”. La energía radiante se refiere a la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas, que incluye la luz visible, los rayos ultravioleta e infrarrojos, entre otros. Esta forma de energía es fundamental en diversos campos, como la iluminación, la medicina, la comunicación y la energía solar. La iluminancia, específicamente, es una medida de la cantidad de luz que incide sobre una superficie, influenciando aspectos tan diversos como la eficiencia energética en edificios, la seguridad en el diseño de espacios públicos y la calidad de vida en entornos laborales y residenciales. En resumen, la iluminancia es una manifestación esencial de la energía radiante, con aplicaciones y relevancia significativas en múltiples áreas de la ciencia y la tecnología (Ministerio de Trabajo Argentina, 2016).

**Figura 15**  
*Espectro electromagnético*



*Nota.* Tomado de (Ministerio de Trabajo Argentina, 2016)

La iluminancia, también conocida como nivel de iluminación, se refiere a la cantidad de luz (medida en lúmenes) que incide sobre una superficie determinada, con la unidad de medida lux ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ) y simbolizada por la letra E. Un mayor nivel de luz, hasta un cierto umbral máximo (límite de deslumbramiento), mejora el rendimiento visual,

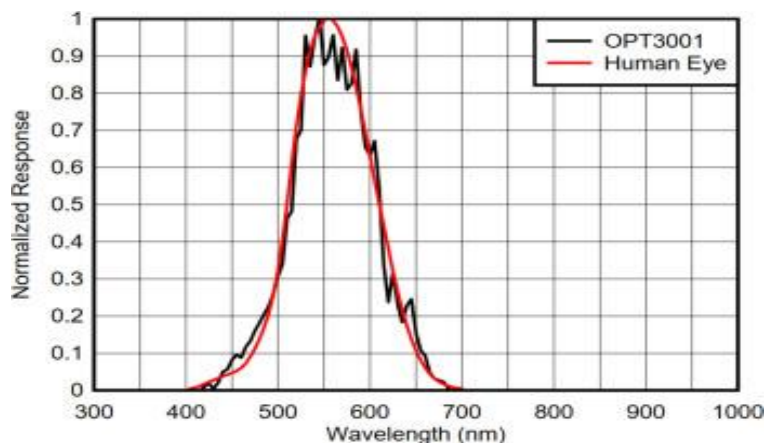


dependiendo del sistema de alumbrado y afectando la visibilidad (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1998).

Las mediciones de iluminancia están reguladas por normas como EN 12193 y EN 12464. Para cumplir con estas normas, se utiliza un medidor de iluminancia calibrado. Los medidores emplean fotodiodos cuyas características espectrales se corresponden con la sensibilidad del ojo humano, lo cual es esencial para lograr mediciones precisas de la iluminancia. Estas características aseguran que las lecturas reflejen adecuadamente la percepción visual humana, garantizando la precisión en diversas aplicaciones, desde la iluminación de espacios hasta la evaluación de condiciones laborales y la optimización de la eficiencia energética en edificios. La correcta calibración y la adecuada correspondencia espectral de los medidores de iluminancia son fundamentales para obtener resultados confiables y cumplir con las normativas establecidas (Cen, 2011).

**Figura 16**

*Medición de iluminancia y la sensibilidad*



Nota. Tomado de (Cen, 2011)

### 2.2.11.2. Sensación de color

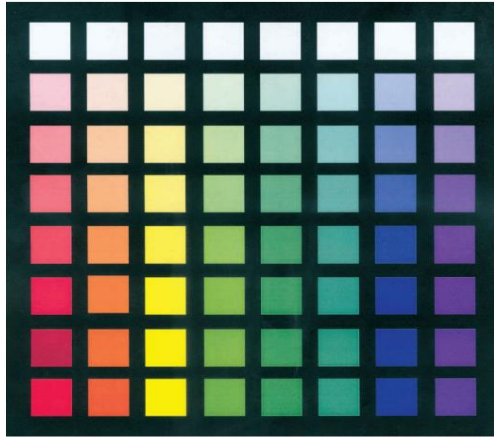
El color facilita la segmentación de la escena visual y realza la prominencia de las entradas visuales en niveles inferiores y superiores; los objetos vistos en sus colores característicos están asociados con el conocimiento del color almacenado en la memoria (Tanaka et al., 2001).

La visión del color comienza con los fotorreceptores cónicos (S, M y L), sensibles a distintas longitudes de onda de la luz (corta, media y larga, respectivamente). Se acepta comúnmente que la codificación de la visión del color se transforma desde estos

tres tipos de conos a tres sistemas oponentes al inicio de la vía visual: rojo (R), verde (G), azul (B), amarillo (Y) y negro-blanco (Dacey, 1996).

**Figura 17**

*Colores que varían en saturación*



Nota. Extraído de (Shevell, 2003)

### 2.2.11.3. Métricas y Medidas de Detección de Objetos

La detección de objetos es una tarea común en la visión computarizada, enfocada en reconocer y determinar la posición de objetos específicos dentro de una imagen. Esto se puede lograr mediante diversas técnicas, como la creación de un rectángulo (bounding box) que rodea al objeto o identificando cada píxel perteneciente al objeto en la imagen, un proceso conocido como segmentación. Cada categoría de objeto tiene atributos distintivos que facilitan su clasificación, como la equidistancia de todos los puntos al centro en el caso de los círculos, o la perpendicularidad de las esquinas y la igualdad en la longitud de los lados para los cuadrados.

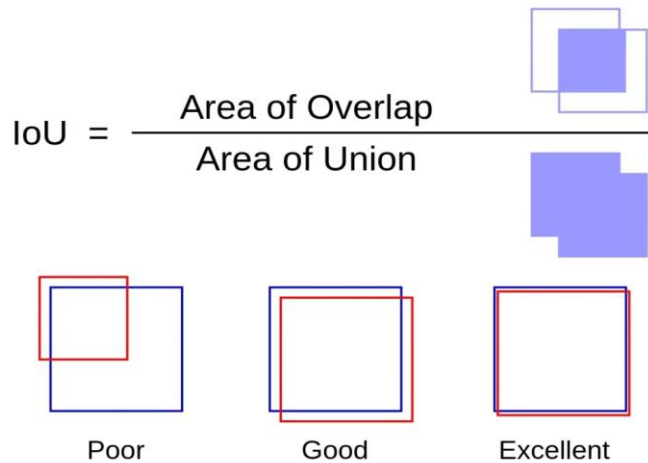
**A. Intersection Over Union (IoU):** La Intersección sobre la Unión (IoU), también conocida como índice de Jaccard, es una métrica utilizada para evaluar la precisión de un sistema de detección de objetos. Se aplica a cualquier algoritmo que genere rectángulos delimitadores como salida.

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Aquí, el numerador representa el área de intersección entre el rectángulo delimitador predicho y el real, mientras que el denominador corresponde al área de la unión de ambos rectángulos. Esta proporción refleja cuán bien se alinean

los rectángulos predichos con los reales, otorgando puntuaciones más altas a las predicciones con mayor superposición (Sánchez, 2020).

**Figura 18**  
*Intersection over Union (IoU)*



*Nota.* Cálculo del IoU.

En la práctica, es raro que las coordenadas de un rectángulo delimitador predicho coincidan exactamente con las del rectángulo real, pero la IoU refleja de manera eficiente la precisión de esta correspondencia.

**B. Mean Average Precision (mAP):** La precisión y el recall son dos indicadores clave para evaluar la eficacia de un modelo de clasificación. La precisión es la proporción de verdaderos positivos (TP) sobre el total de casos identificados positivamente, incluyendo los falsos positivos (FP).

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP}$$

El recall mide la proporción de TP sobre el total de casos realmente positivos, sumando los TP y los falsos negativos (FN).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

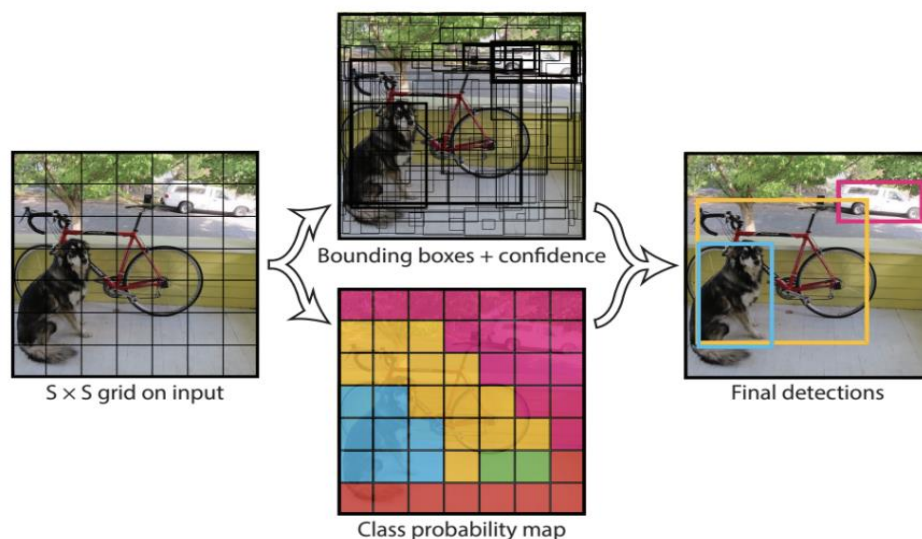
Existe un equilibrio entre precisión y recall que se puede ajustar mediante el umbral softmax en redes neuronales. A menudo se busca alta precisión en tareas como la recuperación de información y la detección de objetos. La métrica mAP

se utiliza para reflejar este equilibrio y evaluar el rendimiento del modelo en la detección de objetos (Sánchez, 2020).

- C. Faster R-CNN:** Faster R-CNN, presentado en "NIPS 2015", es una evolución de R-CNN, que implementó un algoritmo de búsqueda selectiva para sugerir áreas de interés potencial y usó una CNN para clasificarlas y refinarlas. Fast R-CNN introdujo la "Region of Interest Pooling" para optimizar los cálculos. Faster R-CNN simplifica el proceso realizando la detección de objetos mediante una única red neuronal (Liu et al., 2016).
- D. Single Shot MultiBox Detector (SSD):** SSD se basa en la eficiencia y precisión para la detección de objetos, logrando más del 74% en mAP y 59 cuadros por segundo en conjuntos de datos como PascalVOC y COCO. "Single Shot" indica que las operaciones de localización y clasificación se realizan en un solo paso dentro de la red, y "MultiBox" se refiere a una técnica para la regresión de cuadros delimitadores.
- E. You Only Look Once (YOLO):** YOLO es una arquitectura de red que simplifica la detección de objetos mediante una única red neuronal, reformulando la detección como un problema de regresión directa. Esta arquitectura traduce los píxeles de una imagen a coordenadas de cuadros delimitadores y probabilidades de categorías de objetos (Redmon et al., 2015).

**Figura 19**

*Detección de objetos usando (YOLO)*



*Nota.* YOLO aplicando única red convolucional para la detección de objetos.

### **2.2.12. Métodos Metaheurísticos de Optimización**

El término “heurística” en el contexto de la optimización se refiere a un enfoque para resolver problemas sin emplear un método exhaustivo. Se caracteriza por buscar una solución aproximada sin necesidad de asegurar la convergencia durante su aplicación. Estas técnicas son computacionalmente eficientes, ya que no exploran todas las posibles soluciones antes de llegar a una solución final. Los métodos metaheurísticos son especialmente útiles para resolver problemas de búsqueda y optimización, y suelen consistir en una o más heurísticas. Estos métodos son iterativos y comúnmente incluyen operaciones estocásticas en el proceso de búsqueda y modificación de las posibles soluciones (Barragán, 2022).

Los métodos metaheurísticos emplean algoritmos aproximados que proporcionan soluciones aceptables a un problema en tiempos de cálculo razonables. A menudo, se basan en principios naturales, físicos o biológicos y tratan de recrearlos a través de varios operadores. Estos métodos son ideales para problemas de alta complejidad donde las técnicas convencionales de optimización no son aplicables debido a limitaciones prácticas (Herrera, 2017).

La popularidad de los métodos metaheurísticos en la resolución de problemas de optimización se debe a su facilidad de implementación por parte de usuarios no expertos y a su flexibilidad para manejar ciertas características y parámetros del problema. Entre las técnicas metaheurísticas más destacadas por su aplicación en diversos tipos de problemas se encuentran:

- Recocido simulado.
- Algoritmos genéticos.
- Procedimientos de búsqueda basados en funciones “Greedy”
- Búsqueda tabú.

#### **2.2.12.1. Algoritmos Genéticos**

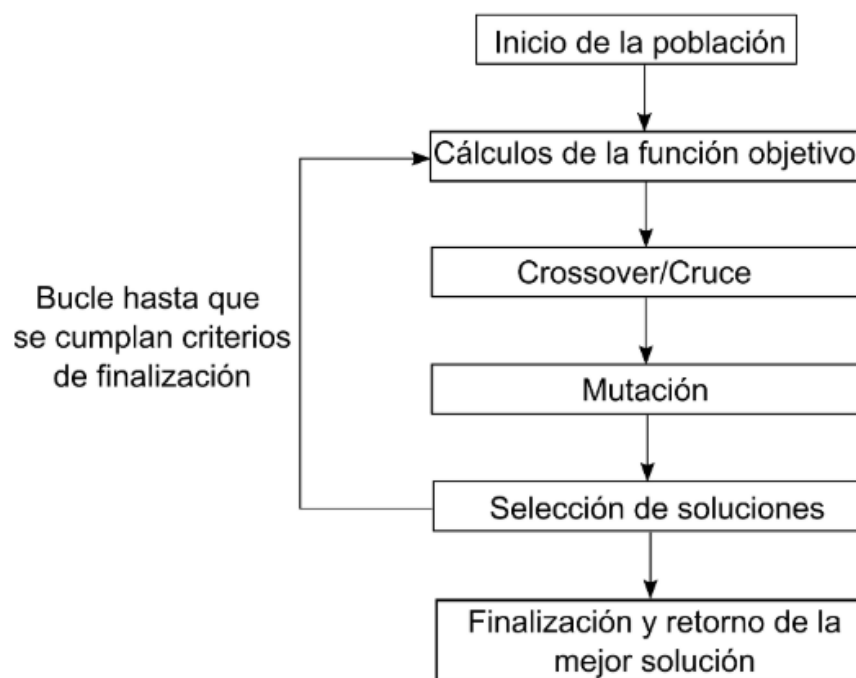
Los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) son técnicas de búsqueda utilizadas en computación para encontrar soluciones aproximadas a

problemas de optimización y búsqueda. Estos pertenecen a una clase particular de algoritmos evolutivos, inspirados en aspectos de la teoría evolutiva de la biología, como la mutación, selección y recombinación o cruce de individuos.

Los algoritmos genéticos se basan en una analogía con el comportamiento natural y operan con una población de individuos que representan posibles soluciones a un problema específico. Cada individuo recibe un valor o puntuación que indica la efectividad de su solución, similar al grado de adaptación de un organismo en la naturaleza para competir por recursos. Los individuos con mayor adaptación tienen una mayor probabilidad de ser seleccionados para reproducirse y cruzar su material genético con otros individuos seleccionados de manera similar. Este cruce genera nuevos individuos que comparten características de sus padres. Por otro lado, los individuos con menor adaptación tienen menos probabilidades de ser seleccionados para reproducirse, lo que resulta en una menor propagación de su material genético en futuras generaciones (Rivero et al., 2010). La figura 12 muestra el diagrama de flujo de un algoritmo genético simple.

**Figura 20**

*Diagrama de flujo de los algoritmos genéticos*



*Nota.* Obtenido de (Barragán, 2022).

## **2.3. Marco conceptual**

### **2.3.1. Comportamiento Hidráulico**

El comportamiento hidráulico implica la utilización de cálculos hidráulicos para el diseño, comenzando con datos como el caudal, el material utilizado, la pendiente longitudinal (S) y la rugosidad (n). Además, abarca la consideración de taludes, los cuales están determinados por las propiedades mecánicas del material y utilizando estos datos, se pueden derivar valores específicos (Loayza y Meza, 2022).

### **2.3.2. Aireación en Resaltos Hidráulicos**

La aireación en resaltos hidráulicos es un proceso crítico donde el aire se mezcla con el agua en flujos rápidos, transformando un estado supercrítico en subcrítico. Esta interacción es esencial para disipar la energía excesiva del agua, reduciendo la erosión y protegiendo las estructuras hidráulicas. Estudiar este fenómeno es vital para optimizar el diseño de canales de riego y presas, garantizando así la seguridad y eficiencia de estas infraestructuras en la gestión de recursos hídricos (Cutillas, 2022).

### **2.3.3. Canal de Riego**

El canal de riego es una infraestructura hidráulica esencial diseñada para transportar agua desde fuentes naturales hasta áreas agrícolas para riego, su eficiencia es clave en la agricultura, especialmente en regiones áridas o semiáridas. Los canales están diseñados cuidadosamente para minimizar la pérdida de agua por evaporación o infiltración, y para mantener un flujo constante y adecuado. Su gestión y mantenimiento son cruciales para asegurar un suministro de agua sostenible y eficiente, vital para el éxito de las prácticas agrícolas (Rojas y Vargas, 2022).

### **2.3.4. Modelación Numérica**

La modelación numérica es una técnica crucial en diversas disciplinas científicas y de ingeniería, utilizada para simular y analizar sistemas complejos que son difíciles de estudiar experimentalmente, mediante algoritmos matemáticos y computacionales, transforma problemas físicos en modelos matemáticos para predecir comportamientos y fenómenos. Esta herramienta permite a los investigadores y profesionales experimentar virtualmente con diferentes escenarios, optimizar diseños y procesos, y tomar decisiones informadas basadas en predicciones precisas y detalladas, lo que resulta en soluciones más eficientes y efectivas en la práctica (Paz et al., 2023).

### **2.3.5. Modelación Computacional**

La modelación computacional es una técnica avanzada que utiliza la computación para simular y analizar sistemas complejos, combina algoritmos matemáticos y poder de procesamiento para crear modelos detallados de fenómenos físicos, químicos o biológicos. Permite a los investigadores y profesionales explorar y entender comportamientos que serían costosos o imposibles de replicar en la realidad (Paz et al., 2023).

### **2.3.6. Gestión de Recursos Hídricos**

La gestión de recursos hídricos implica la planificación y administración sostenible del agua para equilibrar las necesidades humanas y ecológicas, enfocándose en la conservación, distribución y calidad del agua para asegurar su disponibilidad a largo plazo (Rojas y Vargas, 2022).

### **2.3.7. Python**

Python es un lenguaje de programación versátil y de alto nivel, famoso por su simplicidad y eficiencia. Se utiliza ampliamente en desarrollo web, análisis de datos, inteligencia artificial y aprendizaje automático, gracias a su gran biblioteca de recursos y comunidad activa.



### **III. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Enfoque**

La investigación presenta un enfoque cuantitativo. Según Hernández et al. (2014) un enfoque cuantitativo indica la aplicación de datos numéricos y métodos estadísticos para la recopilación, medición y análisis de información. Este enfoque se centra en el uso de métodos computacionales y numéricos para analizar y modelar matemáticamente el fenómeno de la aireación en los resaltos hidráulicos, basándose en la recolección y análisis de datos numéricos para entender y predecir las características y el comportamiento del flujo de agua y su interacción con el aire en condiciones específicas del canal de riego.

#### **3.2. Alcance**

Esta investigación presenta un alcance explicativo ya que se enfoca en entender las causas y efectos del fenómeno estudiado, en este caso, la aireación en resaltos hidráulicos (Hernández et al., 2014). A través del análisis computacional y numérico, la investigación busca explicar cómo diferentes variables y condiciones afectan la aireación en estos resaltos, proporcionando una comprensión detallada de los procesos físicos involucrados.

#### **3.3. Diseño de investigación**

La presente investigación presenta un diseño no experimental y de tipo descriptivo-analítico. En este diseño, se analizan los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural sin manipular o alterar las variables de estudio. Este enfoque se centra en la utilización de la simulación computacional y técnicas numéricas para describir y analizar las características y el comportamiento de la aireación en los resaltos hidráulicos. Al ser un estudio basado en modelación computacional, no involucra experimentación directa, sino más bien la observación y análisis de datos generados a través de modelos numéricos y simulaciones.

#### **3.4. Población y muestra**

##### **3.4.1. Población**

Según Arias (2006), la población se define como un conjunto de elementos, cuyo número puede ser finito o infinito, que comparten características o atributos similares.

La población de esta investigación son todos los resaltos hidráulicos existentes en sistemas de canales de riego similares al Canal de Riego Alfaccata

### **3.4.2. Muestra**

Bernal (2006) describe la muestra como una porción específica seleccionada de la población en la que se realizan mediciones y observaciones de diversas variables. Este subgrupo se elige con el propósito de recolectar información representativa y relevante, lo que ofrece información significativa acerca de la población completa.

Dado que el estudio se centra en el Canal de Riego Alfaccata, la muestra es un subconjunto de resaltos hidráulicos dentro de este canal los cuales se escogerán por conveniencia propia.

## **3.5. Hipótesis**

### **3.5.1. Hipótesis general**

La aireación en los resaltos hidráulicos mejora significativamente el rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en Puquio, Ayacucho, como lo demostrarán los análisis realizados mediante modelos computacionales y numéricos de sus dinámicas hidráulicas.

### **3.5.2. Hipótesis específicas**

- La utilización de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) en el análisis computacional permitirá una caracterización detallada de los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata.
- Desarrollar una rutina en Python para procesar y analizar los datos obtenidos del PDI facilitará una modelización numérica efectiva de la aireación en los resaltos hidráulicos.
- La evaluación y análisis del contenido de aireación en los resaltos hidráulicos utilizando los datos procesados confirmarán que las técnicas computacionales y numéricas son herramientas eficaces para entender la dinámica de la aireación y su impacto en la eficiencia del canal.

## **3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional**

**Tabla 1**  
Cuadro de Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	TIPO	NATURALEZA	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTO
<b>Análisis Computacional y Numérico</b>	El análisis computacional y numérico se refiere al uso de métodos matemáticos y simulaciones computacionales para resolver problemas complejos, permitiendo modelar y analizar fenómenos físicos mediante aproximaciones numéricas que facilitan la obtención de resultados precisos y detallados.	<b>Independiente</b>	<b>Cuantitativo</b>	Análisis Computacional	Procesamiento digital de imágenes (PDI)	píxeles (px)	<b>Cámaras de análisis</b>  <b>Softwares estadísticos y de Análisis de datos (Excel y Python)</b>
					Simulación computacional del flujo	porcentaje (%)	
					Rutina de datos en Python	milisegundos (ms)	
				Análisis Numérico	Modelización numérica	porcentaje error (%)	
					Eficiencia de los algoritmos numéricos	porcentaje (%)	
<b>Nivel de aireación de resaltos hidráulicos</b>	Es la cantidad de aire incorporado en el agua durante el salto, crucial para disipar energía, reducir erosión y estabilizar el flujo, mejorando así la eficiencia y seguridad del canal (Cutillas, 2022).	<b>Dependiente</b>	<b>Cuantitativo</b>	Contenido de aireación disuelto	<b>Cantidad de aire disuelto en el agua</b>	Froude (F)	<b>Fichas de recolección de datos</b>
				Tasa de aireación	<b>Volumen de aire incorporado en el agua por segundo</b>	m <sup>3</sup> /s	
				Eficiencia de aireación	<b>Eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos.</b>	porcentaje (%)	

Nota. Elaboración propia

### **3.7. Técnicas e instrumentos**

#### **3.7.1. Técnicas**

- Modelado Computacional y Simulación Numérica
- Procesamiento Digital de Imágenes (PDI)
- Programación en Python
- Análisis Estadístico y Matemático
- Visualización de Datos

#### **3.7.2. Instrumento**

- Computadora u ordenador con un sistema operativo Windows 10.
- Softwares estadísticos y de Análisis de datos (Excel y Python)
- Fichas de recolección de datos
- Librerías y Herramientas de Python para el modelamiento matemático
- Cámara de análisis
- Visual Studio

### **3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información**

- Se utilizará un análisis descriptivo para resumir y visualizar los datos obtenidos de las simulaciones numéricas y las imágenes.
- Se utilizará un análisis de correlación para determinar si existe una relación estadísticamente significativa.
- Se utilizará un análisis de Imágenes para el procesamiento de imágenes, donde se emplearán técnicas de visión por computadora, como la segmentación de imágenes, la extracción de características y el seguimiento de objetos para analizar la formación de burbujas de aire en los resaltos hidráulicos

### **3.9. Desarrollo de Trabajo de Tesis**

#### **3.9.1. Antecedentes de la zona de estudio**

En la Comunidad de Ccayao y Pichccachuri, ubicada en el distrito de Puquio, provincia de Lucanas, la mayoría de los habitantes se dedican a la ganadería y la

agricultura. Actualmente, carecen de infraestructura de riego adecuada, lo que los obliga a practicar una agricultura de secano. El canal de Alfaccata es un canal lateral que transporta agua a través de un canal de tierra desde la Laguna Yauriwiri y la Represa de Pachaya, distribuyéndose a través del canal principal Wanawecce-Orccompata. Este canal principal conduce constantemente un caudal de 300 l/s, que se distribuye en canales laterales a lo largo de su recorrido, incluyendo el canal lateral de Alfaccata.

La captación del agua para el proyecto se realizará en el canal Alfaccata, específicamente en San Martín, con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud 14°42'3.07"S (UTM 18 E=592986.59) y Longitud 74°8'10.63"S (UTM 18 L N=8374582.71). Durante la época de estiaje, se midió un caudal de 75 l/s, lo que garantiza la oferta hídrica necesaria para el proyecto. Este caudal, demandado a 75 l/s, con una eficiencia de riego del 43%, permitirá irrigar una superficie agrícola de 60 hectáreas.

### **3.9.2. Ubicación de la zona de estudio**

#### **3.9.2.1. Ubicación Geográfica**

La Tabla 2 muestra el nombre y la ubicación de la fuente de agua que se utilizará para riego, especificando las coordenadas UTM de la captación

**Tabla 2**

*Ubicación en coordenadas UTM*

Nombre de la fuente de agua	Estructura hidráulica	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m.s.n.m)
Canal Alfaaccata	Canal de riego	8374582.00	592986.00	3213.00

#### **3.9.2.2. Ubicación Hidrográfica**

- **Vertiente:** Pacífico
- **Cuenca:** Acari
- **Unidad hidrográfica:** Acari

### 3.9.2.3. Ubicación Política

- Región/Dpto.: Ayacucho
- Provincia: Lucanas.
- Distrito: Puquio.
- Sector: Alfaccata

**Figura 21**

*Ubicación política*



*Nota.* Imagen tomada de Google Maps.

### 3.9.2.4. Vías de Comunicación a la zona de estudio

La zona del proyecto, situada en los sectores de Alfaccata, se encuentra en el distrito de Puquio. Los accesos principales desde la ciudad de Lima y Ayacucho son los siguientes:

**Tabla 3**

*Vías de accesibilidad desde la capital y desde la ciudad de Huamanga - Ayacucho*

DE	A	DISTANCIA (KM)	VÍA	TIEMPO	VEHÍCULO
LIMA	NASCA	457	ASFALTADA	07 horas	AUTOS, BUSES

NASCA	PUQUIO	159	ASFALTADA	04 horas	AUTOS, BUSES
AYACUCHO	PUQUIO	750	ASFALTADA	10 horas	AUTOS, COMBIS

### 3.9.3. Datos del Canal de Riego Alfaccata

En la Tabla 4, se presenta la disponibilidad de agua que se aprovechará del canal de Alfaccata, junto con las coordenadas UTM (WGS84-Zona 18) y la evaluación de caudal realizada durante la temporada de estiaje.

**Tabla 4**

*Evaluación del Canal de Riego Alfaccata*

N°	Nombre de la fuente de agua	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m.s.n.m)	Caudal (l/s)
1	Canal Alfaccata	8374582.00	592986.00	3213	75.0

En la Tabla 5, se presentan los cálculos realizados para la evaluación de los caudales de agua utilizando el método del flotador.

**Tabla 5**

*Cálculo del caudal del agua en el canal Alfaccata*

Descripción	Detalle
Autoridad Administrativa del Agua	Chaparra - Chincha
ALA	Chaparra - Acari
Localidad	Alfaccata
Estructura Hidráulica	Canal de Riego
Coordenadas UTM (WGS84) Zona 18	Norte: 8374545.91 Este: 592988.25
Altitud	3210 m.s.n.m
Lugar de aforo	Canal de Alfaccata
Método de aforo	Flotador
Volumen de Balde	-
Sección	-
Largo (m)	5
Área (m <sup>2</sup> )	0.072
Tiempo (Segundos)	-
T1	4
T2	6
T3	4

T4	5
T5	5
Tiempo Promedio (Seg)	4.8
Área (m <sup>2</sup> )	0.072
Velocidad (m/s)	1.04
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.075
Caudal (l/s)	75

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

Según la Tabla 5, se infiere lo siguiente:

**a) Ubicación y Autoridad Administrativa:**

- La fuente de agua del Canal Alfaccata se encuentra bajo la jurisdicción de las autoridades de Chaparra - Chincha y Chaparra - Acari. La localidad específica es Alfaccata, y la estructura hidráulica es un canal de riego.
- Las coordenadas UTM proporcionadas (Norte: 8374545.91, Este: 592988.25) y la altitud de 3210 m.s.n.m indican la ubicación precisa del canal.

**b) Método de Aforo:**

- El método utilizado para medir el caudal es el método del flotador, el cual es adecuado para canales abiertos. Este método consiste en medir el tiempo que tarda un flotador en recorrer una distancia específica.

**c) Sección del Canal:**

- La longitud de la sección medida del canal es de 5 metros, con un área transversal de 0.072 m<sup>2</sup>. Esto proporciona información sobre el tamaño y la forma del canal, lo cual es crucial para calcular el caudal.

**d) Tiempos de Medición:**

- Se realizaron cinco mediciones de tiempo (T1 a T5) para que el flotador recorriera los 5 metros del canal, obteniéndose tiempos de 4, 6, 4, 5 y 5 segundos respectivamente.
- El tiempo promedio calculado es de 4.8 segundos, lo que se utiliza para determinar la velocidad del flujo.



**e) Velocidad del Flujo:**

- La velocidad del flujo en el canal se calcula como 1.04 m/s, basada en el tiempo promedio y la distancia recorrida.

**f) Caudal del Canal:**

- Utilizando la velocidad del flujo y el área de la sección transversal del canal, se calcula el caudal en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s), que resulta ser 0.075 m<sup>3</sup>/s.
- Convertido a litros por segundo (l/s), el caudal es de 75.0 l/s. Este valor es esencial para determinar la capacidad de riego del canal y garantizar que se pueda satisfacer la demanda hídrica para las áreas agrícolas dependientes.

**3.9.4. Cálculo del caudal en una sección natural con rugosidad constante**

Para realizar los cálculos se utilizarán las ecuaciones de flujo uniforme en canales abiertos. A continuación, se presentan los cálculos basados en los datos proporcionados:

**Datos de Entrada:**

- **Pendiente (S):** 0.002 m/m
- **Coefficiente de rugosidad (n):** 0.04
- **Profundidad en el margen (ho):** 0.43 m
- **Tramos:**
  - **Tramo 1:** L = 0.21 m, h = 0.48 m
  - **Tramo 2:** L = 0.21 m, h = 0.5 m
  - **Tramo 3:** L = 0.21 m, h = 0.5 m
  - **Tramo 4:** L = 0.21 m, h = 0.5 m
  - **Tramo 5:** L = 0.21 m, h = 0.47 m

**a) Área Hidráulica (A):**

Sumamos las áreas de cada tramo.

$$A = \sum (L \times h)$$

$$A = (0.21 \times 0.48) + (0.21 \times 0.5) + (0.21 \times 0.5) + (0.21 \times 0.5) + (0.21 \times 0.47)$$

$$A = 0.1008 + 0.105 + 0.105 + 0.105 + 0.0987$$

$$A = 0.5145 \text{ m}^2$$

El área hidráulica es la sección transversal del canal ocupada por el agua. Este valor se calcula sumando las áreas de las secciones transversales de los diferentes tramos del canal. Un área hidráulica de 0.5145 metros cuadrados indica que esta es la superficie efectiva a través de la cual el agua está fluyendo, afectando directamente la capacidad del canal para transportar agua.

**b) Eslora de agua (T):**

Sumamos los perímetros de cada tramo.

$$P = \sum L$$

$$P = 0.21 \times 5$$

$$P = 1.05 \text{ m}$$

La eslora de agua es la distancia horizontal cubierta por el agua en la sección transversal del canal. Un valor de 1.05 metros indica que el agua cubre esta distancia horizontalmente, proporcionando una medida de la extensión del agua a lo largo del canal.

**c) Radio Hidráulico (R):**

Como datos obtenemos que el perímetro mojado  $P_m$  es de 1.96 m, el cual es la longitud del contorno del canal que está en contacto con el agua. Un perímetro mojado de 1.96 metros influye en la fricción que el agua encuentra al fluir. Un mayor perímetro mojado significa mayor resistencia al flujo, lo que puede reducir la velocidad del agua.

$$R = \frac{A}{P_m}$$

$$R = \frac{0.5145}{1.96}$$

$$R = 0.2623 \text{ m}$$

El radio hidráulico es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado. Un radio hidráulico de 0.2623 metros es una medida de la eficiencia del flujo de

agua en el canal. Un mayor radio hidráulico generalmente indica una menor resistencia y una mayor eficiencia en el transporte del agua.

**d) Velocidad del flujo (v):**

Usamos la fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2}$$
$$v = \frac{1}{0.04} \times (0.2623)^{2/3} \times (0.002)^{1/2}$$
$$v = 25 \times 0.409 \times 0.0447$$
$$v = 0.457 \text{ m/s}$$

La velocidad del flujo indica la rapidez con la que el agua se mueve a través del canal. Una velocidad de 0.457 metros por segundo significa que el agua recorre esta distancia en un segundo. Esta velocidad es adecuada para asegurar un flujo constante sin causar erosión excesiva en el canal.

**e) Caudal (Q):**

$$Q = A \times v$$
$$Q = 0.5145 \times 0.457$$
$$Q = 0.2351 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal total representa el volumen de agua que fluye a través del canal por segundo. En este caso, 0.2351 metros cúbicos por segundo, equivalentes a 235.1 litros por segundo. Este valor es crucial para dimensionar la capacidad del canal y asegurar que puede transportar suficiente agua para las necesidades de riego sin desbordarse.

**f) Número de Froude (F):**

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \times D}}$$

Donde:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$D = \frac{A}{T}$$

$$D = \frac{0.5145}{1.05}$$

$$D = 0.49 \text{ m}$$

Reemplazamos en la ecuación del número de Froude:

$$F = \frac{0.457}{\sqrt{9.81 \times 0.49}}$$

$$F = \frac{0.457}{2.19}$$

$$F = 0.2089$$

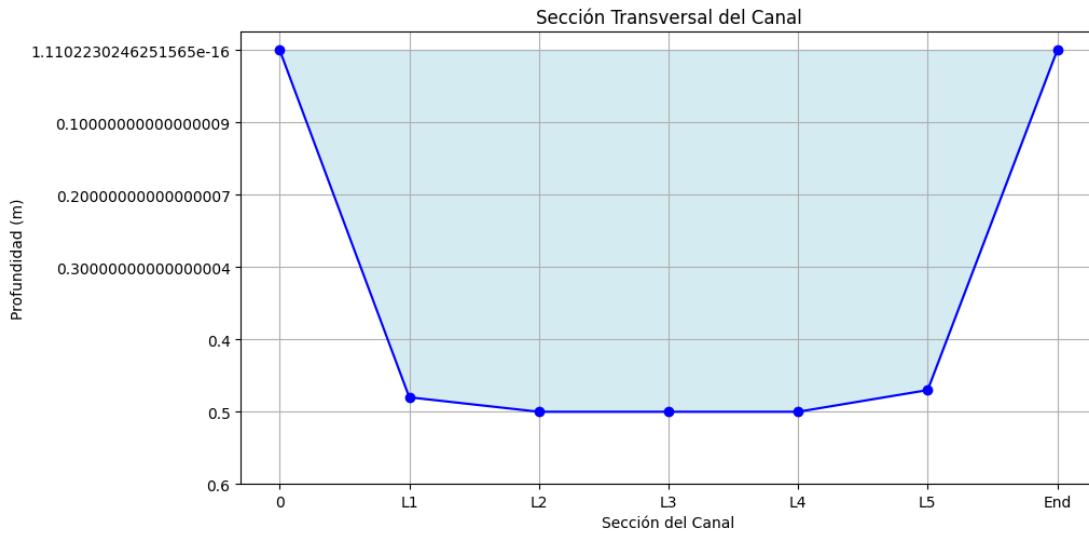
El número de Froude es una relación adimensional que compara la velocidad del flujo con la velocidad de las ondas de superficie en el canal. Un número de Froude de 0.2089, menor que 1, indica un flujo subcrítico, lo que significa que las ondas pueden propagarse en ambas direcciones y el flujo es estable. Este tipo de flujo es ideal para canales de riego, ya que permite una distribución uniforme del agua.

#### Resultados:

- **Caudal total (Q):** 0.2351 m<sup>3</sup>/s
- **Área hidráulica (A):** 0.5145 m<sup>2</sup>
- **Perímetro mojado (P):** 1.96 m
- **Radio hidráulico (R):** 0.2623 m
- **Velocidad (v):** 0.457 m/s
- **Número de Froude (F):** 0.2089
- **Eslora de agua (T):** 1.05 m

La Figura 21, muestra la sección transversal de un canal de riego, detallando la profundidad del agua en diferentes tramos (L1 a L5), donde se delinean la forma del canal y la profundidad del agua en cada tramo y se destaca la sección ocupada por el agua, proporcionando una visualización clara del perfil del canal.

**Figura 22**  
*Sección transversal del canal*



**3.9.5. Usos y demandas de agua en el canal de riego**

Se observa la disponibilidad hídrica del canal Alfaccata, que es de 75 l/s durante las épocas de estiaje. También se menciona el caudal disponible para cada mes a lo largo del año.

**Tabla 6**  
*Disponibilidad mensual del recurso hídrico l/s y m³/mes*

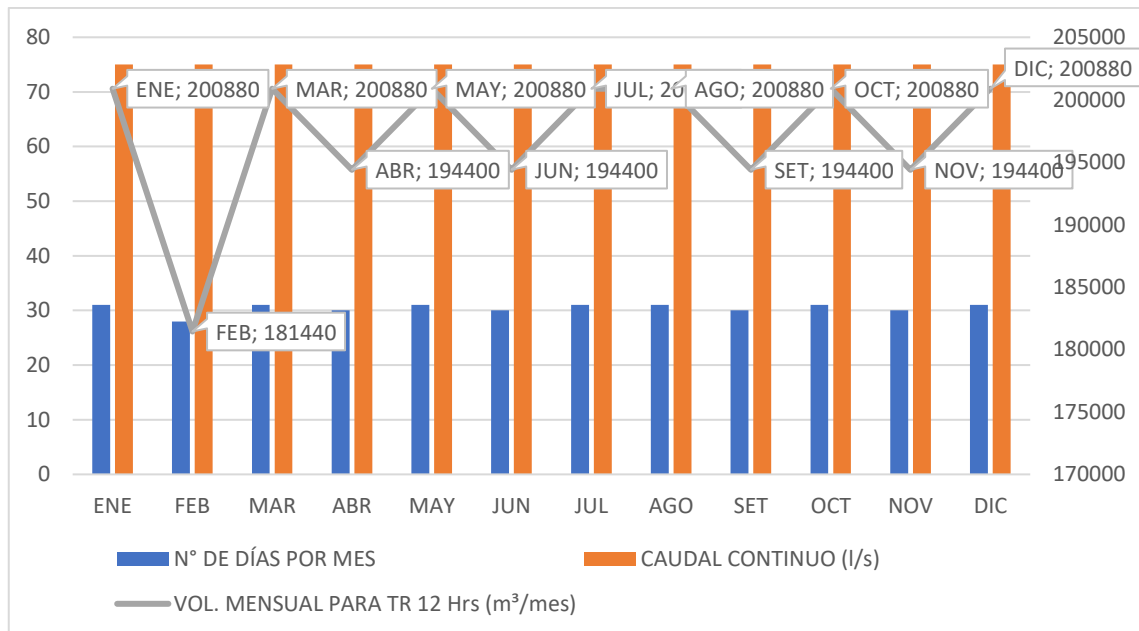
MES	Nº DE DÍAS POR MES	CAUDAL CONTINUO (l/s)	VOL. MENSUAL PARA TR 12 Hrs (m³/mes)
ENE	31	75	200880
FEB	28	75	181440
MAR	31	75	200880
ABR	30	75	194400
MAY	31	75	200880
JUN	30	75	194400
JUL	31	75	200880
AGO	31	75	200880
SET	30	75	194400
OCT	31	75	200880

NOV	30	75	194400
DIC	31	75	200880

La tabla 6 muestra la oferta mensual de agua de riego con el proyecto, incluyendo el número de días por mes, el caudal continuo en litros por segundo y el volumen mensual de agua para 12 horas de riego en metros cúbicos por mes. Asimismo, en la tabla, se muestra la demanda de agua del cultivo, obtenida del estudio agrológico del proyecto de acuerdo con la cédula de cultivo. En otras palabras, el proyecto requiere 75 l/s para irrigar una superficie de 60.00 hectáreas.

**Figura 23**

*Volumen. Mensual para TR 12 Hrs (m<sup>3</sup>/mes)*



Con la información sobre la disponibilidad mensual de agua brindada en la Tabla 6 y Figura 22, los agricultores pueden planificar el riego de sus cultivos de manera más eficiente. Esto asegura que las plantas reciban la cantidad de agua necesaria durante todo el año, evitando tanto el déficit como el exceso de riego. Además, el conocimiento del caudal continuo y el volumen mensual de agua disponible permite optimizar el uso del recurso hídrico, evitando desperdicios y promoviendo su utilización sostenible.

**Tabla 7***Demanda de agua con precipitación efectiva al 75%*

<b>Factores</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
días/mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Área cult./mes (Has)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Kc Ponderado	0.97	1.07	0.91	0.72	0.48	0.73	0.89	1.03	0.97	0.84	0.48	0.77
ETo - Evapotransp. Potencial Diario (mm)	4.35	3.9	3.58	3.34	3.27	2.91	3	3.52	4.24	4.89	5.22	6.12
ETc - Evapotransp. Potencial Real o U.C. (mm/día)	4.23	4.19	3.27	2.39	1.55	2.12	2.66	3.62	4.12	4.12	2.48	4.73
Precip. Efectiva (mm/mes)	83.05	84.89	85.48	29.51	0	0	0	0	10.32	32.9	34.55	68.83
Lámina Neta (Ln) (mm/mes)	48.19	32.34	15.92	42.23	48.11	63.68	82.41	112.36	113.32	94.83	39.78	77.95
Efic. Riego	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Lámina Bruta (Lb) (mm/mes)	137.69	92.39	45.48	120.67	137.46	181.93	235.46	321.02	323.76	270.94	113.67	222.71
Demanda (m3/Ha)	1376.9	923.95	454.85	1206.7	1374.62	1819.29	2354.6	3210.16	3237.59	2709.35	1136.68	2227.13
Demanda Total*1000 (m3)	82.61	55.44	27.29	72.4	82.48	109.16	141.28	192.61	194.26	162.56	68.2	133.63
N°Horas de riego/día	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Demanda para 24 Horas (l/seg)	30.84	22.92	10.19	27.93	30.79	42.11	52.75	71.91	74.94	60.69	26.31	49.89
Módulo de Riego (l/s/Ha)	0.51	0.38	0.17	0.47	0.51	0.7	0.88	1.2	1.25	1.01	0.44	0.83
Caudal diseño (m3/seg)	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

La tabla 7 muestra la demanda de agua mensual para el proyecto de riego en las comunidades de Ccayao y Pichccachuri, en Puquio, Ayacucho. Para cada mes, se indican los días del mes, el área cultivada, y el coeficiente de cultivo. También se incluyen datos sobre la evapotranspiración potencial diaria y la real, que reflejan la cantidad de agua que los cultivos necesitan diariamente.

La precipitación efectiva mensual muestra cuánta lluvia contribuye al riego, mientras que la lámina neta y la lámina bruta indican el agua necesaria para satisfacer las demandas del cultivo, considerando las pérdidas del sistema de riego. La demanda de agua se presenta tanto por hectárea como para toda el área cultivada, ayudando a calcular el volumen total de agua requerido. Además, se incluyen datos sobre el número de horas de riego diario y la demanda de agua en litros por segundo para 24 horas, lo que ayuda a planificar el tiempo y el flujo de riego. Finalmente, el módulo de riego y el caudal de diseño aseguran que el sistema de riego pueda satisfacer las necesidades de agua de los cultivos.

### **3.9.6. Balance hídrico**

El balance hídrico se llevó a cabo mediante el análisis de la oferta y demanda de agua para el cultivo. Actualmente, se observa que el canal de tierra Alfaccata tiene la capacidad de transportar 80 l/s durante los meses de crecida y 75 l/s durante los meses de estiaje. De esta cantidad ofertada, solo se requiere un caudal constante de 75 l/s para satisfacer la demanda de agua de los cultivos.

**Tabla 8**

*Volumen mensual demandado y ofertado*

<b>MES</b>	<b>Volumen Demandado (m3/mes)</b>	<b>Volumen Ofertado (m3/mes)</b>
ENE	82613.7	200880
FEB	55436.8	181440
MAR	27290.7	200880
ABR	72402.2	194400
MAY	82477.2	200880
JUN	109157.6	194400
JUL	141275.9	200880
AGO	192609.7	200880



SET	194255.4	194400
OCT	162561.2	200880
NOV	68200.6	194400
DIC	133267.6	200880

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

Para calcular el balance hídrico utilizamos una fórmula simple de resta para encontrar la diferencia entre el volumen mensual ofertado y el volumen mensual demandado. A continuación, se muestra el proceso matemático.

$$\text{Balance Hídrico} = \text{Volumen Demandado} - \text{Volumen Ofertado}$$

Donde:

**Volumen Demandado (m³/mes):** La cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda de riego en un mes.

**Volumen Ofertado (m³/mes):** La cantidad de agua disponible en el canal para un mes.

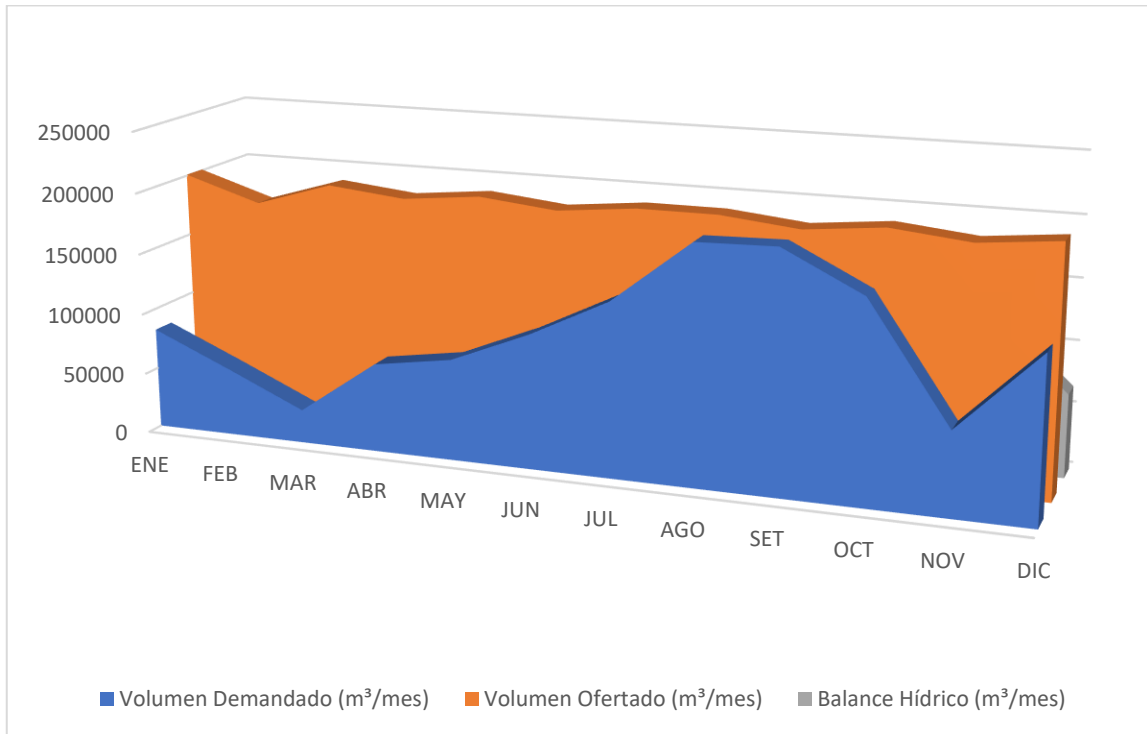
**Tabla 9**

*Balance Hídrico calculado*

MES	Volumen Demandado (m³/mes)	Volumen Ofertado (m³/mes)	Balance Hídrico (m³/mes)
ENE	82613.7	200880	118266.3
FEB	55436.8	181440	126003.2
MAR	27290.7	200880	173589.3
ABR	72402.2	194400	121997.8
MAY	82477.2	200880	118402.8
JUN	109157.6	194400	85242.4
JUL	141275.9	200880	59604.1
AGO	192609.7	200880	8270.3
SET	194255.4	194400	144.6
OCT	162561.2	200880	38318.8
NOV	68200.6	194400	126199.4
DIC	133267.6	200880	67552.4

Este balance hídrico muestra que en todos los meses del año hay un superávit de agua, ya que el volumen ofertado siempre excede al volumen demandado, indicando una disponibilidad adecuada para satisfacer la demanda de riego.

**Figura 24**  
*Balance Hídrico (m³/mes)*



### 3.9.7. Análisis hidrometeorológico

Según la información proporcionada por el SENAMHI, se ha evaluado la influencia, funcionamiento, períodos de registro y disponibilidad de datos de cuatro estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Estas estaciones registran principalmente parámetros de precipitación total y precipitación en 24 horas. A continuación, se presenta la ubicación geográfica de estas estaciones (Ver Anexo N°2,3,4 y 5).

**Tabla 10**  
*Estaciones Meteorológicas*

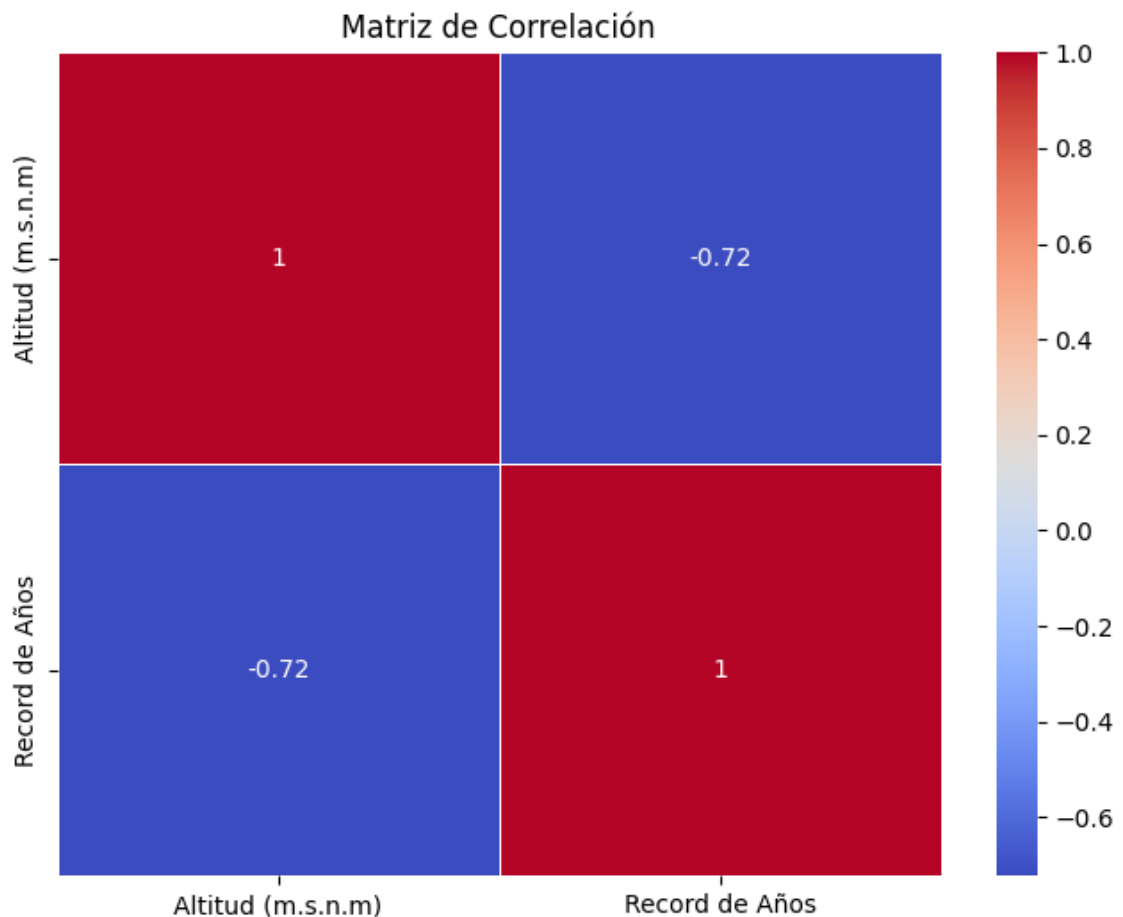
Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m)	Provincia	Distrito	Récord de Años
Coracora	15°01'01" S	73°47'01" O	3172	Parinacochas	Coracora	23
Cceccana	14°36'01" S	74°00'01" O	4406	Lucanas	Puquio	16
Puquio	14°42'42" S	74°8'8" O	2977	Lucanas	Puquio	50
Lucanas	14°37'37" S	74°14'14" O	3297	Lucanas	Lucanas	47

### 3.9.7.1. Análisis de Correlación

La matriz de correlación (Ver Figura 24) muestra la relación entre la altitud (en metros sobre el nivel del mar) y el registro de años de datos.

**Figura 25**

*Matriz de correlación*



De esta gráfica se infiere lo siguiente:

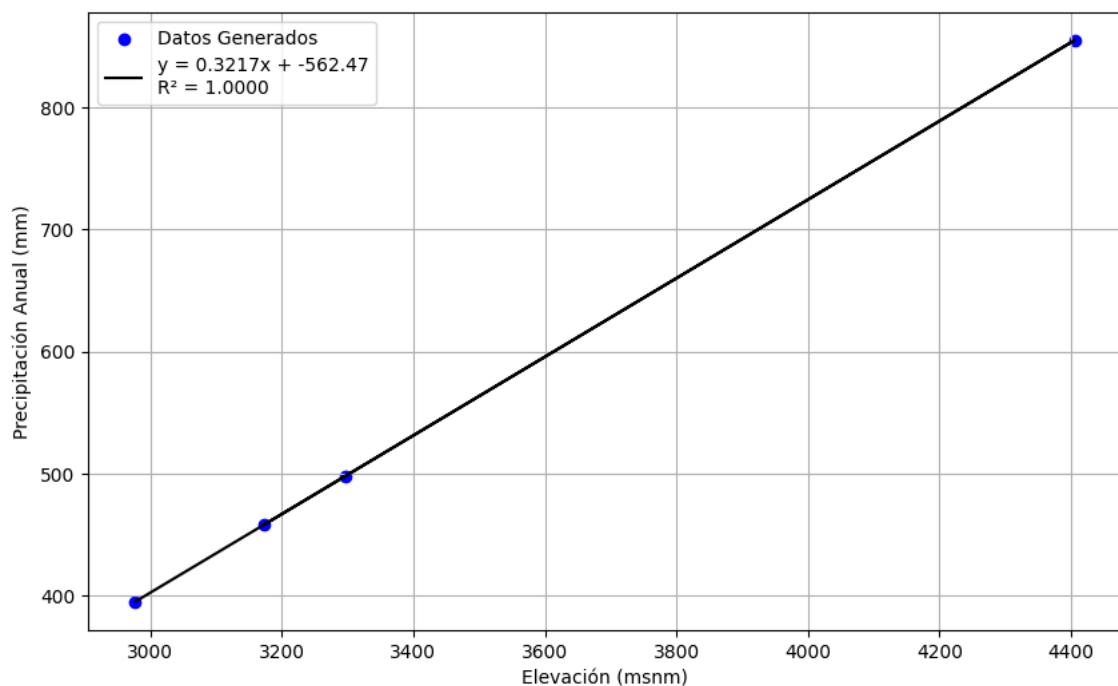
- El valor de correlación es -0.72, lo que indica una correlación negativa moderada entre la altitud y el registro de años. Esto sugiere que a medida que la altitud aumenta, el registro de años de datos tiende a disminuir, y viceversa. Sin embargo, no es una relación perfectamente inversa, solo moderadamente negativa.
- El valor es 1, lo cual es esperado ya que cualquier variable tiene una correlación perfecta consigo misma.

- La correlación negativa moderada entre altitud y registro de años puede indicar que las estaciones meteorológicas en zonas más altas tienden a tener menos años de registros comparadas con aquellas en altitudes menores. Esto podría deberse a varios factores, como la accesibilidad de las estaciones, la infraestructura disponible en diferentes altitudes, o incluso la historia del establecimiento de estaciones en diferentes regiones.

A continuación, se muestra la relación entre la elevación (en metros sobre el nivel del mar) y la precipitación anual (en milímetros) en diferentes estaciones meteorológicas.

**Figura 26**

*Curva Elevación - Precipitación*



De la Figura se infiere lo siguiente:

- La gráfica muestra una relación lineal positiva entre la elevación y la precipitación anual. Esto significa que a medida que la elevación aumenta, la cantidad de precipitación anual también aumenta.

- La ecuación de la línea de tendencia es  $y = 0.3217x - 562.47$ . Esta ecuación indica que, por cada metro adicional de elevación, la precipitación anual aumenta en aproximadamente 0.3217 mm.
- El término -562.47 es la intersección de la línea con el eje de precipitación anual cuando la elevación es cero, aunque este valor no tiene un significado físico en este contexto, ya que una elevación de cero metros no es relevante para las estaciones meteorológicas consideradas.
- El valor de  $R^2$  es 1.0000, lo que indica una correlación perfecta entre la elevación y la precipitación anual en los datos generados. Esto sugiere que la variabilidad en la precipitación anual se explica completamente por la variabilidad en la elevación según este modelo lineal.

### 3.9.8. Determinación de la demanda

De acuerdo a las consideraciones de la investigación y a las características climáticas de la zona, se ha proyectado la demanda bajo el siguiente procedimiento:

#### 3.9.8.1. Evapotranspiración Potencial (ETo)

Los resultados de la evapotranspiración para la zona de cultivos son los siguientes:

**Tabla 11**  
*Evapotranspiración Potencial (ETo) por mes*

Mes	TMM (°C)	TMF	MF	HR	CH	CE	ETo (mm/mes)	ETo (mm/día)
ENE	12.31	54.15	2.652	70.7	0.9	1.06	137.35	4.43
FEB	12.22	54	2.305	82.8	0.69	1.06	91.29	3.26
MAR	12.22	54	2.345	80.3	0.74	1.06	99.25	3.2
ABR	12.13	53.84	1.981	71.9	0.88	1.06	99.98	3.33
MAY	11.58	52.85	1.175	54.8	1	1.06	66.16	2.13
JUN	11.26	52.27	1.572	50.3	1	1.06	87.47	2.92
JUL	10.97	51.75	1.684	48.5	1	1.06	92.77	2.99
AGO	11.65	52.99	1.88	47.7	1	1.06	106.05	3.42
SET	12.11	53.79	1.95	48.2	1	1.06	111.65	3.72
OCT	12.51	54.51	2.21	50	1	1.06	128.25	4.14
NOV	12.45	54.41	2.26	50.9	1	1.06	130.91	4.36
DIC	12.67	54.81	2.38	64.1	0.99	1.06	138.09	4.45

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

### 3.9.8.2. Precipitación Efectiva

Para el cálculo de la precipitación efectiva se utilizará la media mensual proporcionada en el Anexo N° 5, para calcular la precipitación efectiva (PPE) para cada mes, según los criterios dados:

**Tabla 12**

*Precipitación Media (mm) mensual en la estación de Puquio*

Mes	Precipitación Media (mm)
Enero	94.86
Febrero	109.04
Marzo	102.21
Abril	20.81
Mayo	4.29
Junio	1
Julio	3.2
Agosto	2.93
Septiembre	5.68
Octubre	6.69
Noviembre	10.44
Diciembre	35.83

*Nota.* Datos tomados del Anexo N°5

Para esto primero consideramos la distribución PPE efectiva mediante el método U.S.A. El cuál es el siguiente:

**Tabla 13**

*Distribución PPE efectiva*

VAR. PRECIPITACIÓN	% PE
5	0
30	95
55	90
80	82
105	65
130	45
155	25
>155	5

**Cálculo de Precipitación Efectiva (PPE):**

**A. Para Enero (94.86 mm):**

- $55 \text{ mm} < P \leq 80 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 82\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.82 * 94.86 = 77.7852 \text{ mm}$

**B. Para Febrero (109.04 mm):**

- $105 \text{ mm} < P \leq 130 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 45\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.45 * 109.04 = 49.068 \text{ mm}$

**C. Para Marzo (102.21 mm):**

- $80 \text{ mm} < P \leq 105 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 65\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.65 * 102.21 = 66.4365 \text{ mm}$

**D. Para Abril (20.81 mm):**

- $5 \text{ mm} < P \leq 30 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 95\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.95 * 20.81 = 19.7695 \text{ mm}$

**E. Para Mayo (4.29 mm):**

- $P \leq 5 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 0\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0 \text{ mm}$

**F. Para Junio (1.00 mm):**

- $P \leq 5 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 0\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0 \text{ mm}$

**G. Para Julio (3.20 mm):**

- $P \leq 5 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 0\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0 \text{ mm}$

**H. Para Agosto (2.93 mm):**

- $P \leq 5 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 0\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0 \text{ mm}$

**I. Para Septiembre (5.68 mm):**

- $5 \text{ mm} < P \leq 30 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 95\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.95 * 5.68 = 5.396 \text{ mm}$

**J. Para Octubre (6.69 mm):**

- $5 \text{ mm} < P \leq 30 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 95\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.95 * 6.69 = 6.3555 \text{ mm}$

**K. Para Noviembre (10.44 mm):**

- $5 \text{ mm} < P \leq 30 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 95\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.95 * 10.44 = 9.918 \text{ mm}$

**L. Para Diciembre (35.83 mm):**

- $30 \text{ mm} < P \leq 55 \text{ mm} \rightarrow \text{PPE} = 90\% \text{ de } P$
- $\text{PPE} = 0.90 * 35.83 = 32.247 \text{ mm}$

**Tabla 14**

*Resumen de la Precipitación Efectiva (PPE) (mm)*

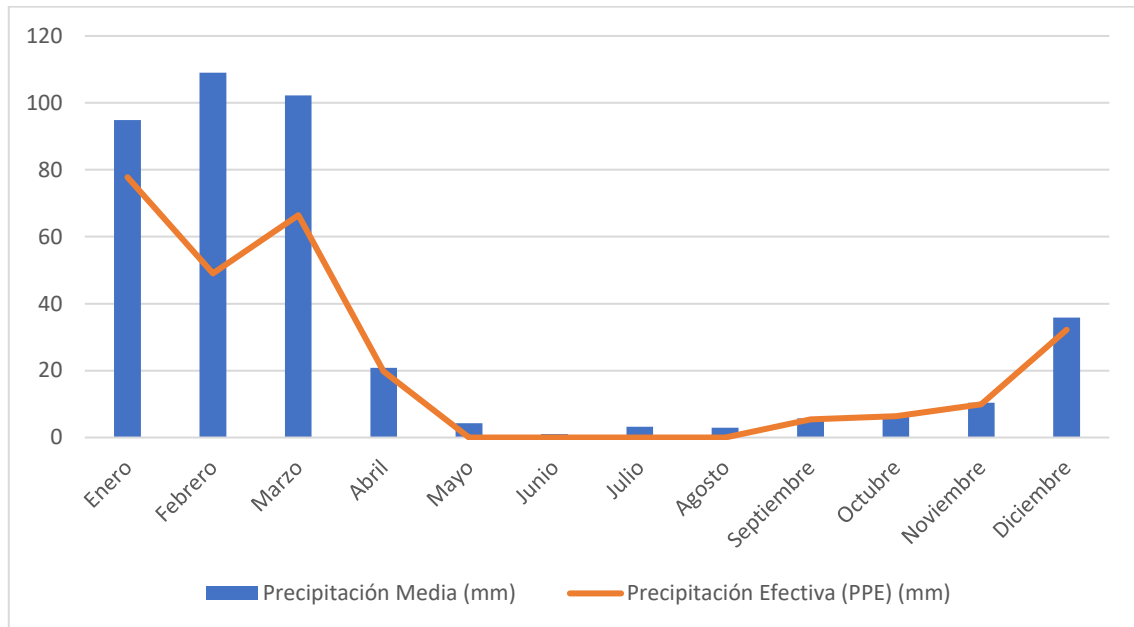
<b>Mes</b>	<b>Precipitación Media (mm)</b>	<b>Precipitación Efectiva (PPE) (mm)</b>
Enero	94.86	77.7852
Febrero	109.04	49.068
Marzo	102.21	66.4365
Abril	20.81	19.7695
Mayo	4.29	0
Junio	1	0
Julio	3.2	0
Agosto	2.93	0
Septiembre	5.68	5.396
Octubre	6.69	6.3555
Noviembre	10.44	9.918
Diciembre	35.83	32.247



Estos cálculos proporcionan la precipitación efectiva (PPE) mensual en función de la media de la precipitación mensual y los criterios establecidos para calcular la PPE.

**Figura 27**

*Precipitación Media vs Precipitación Efectiva (mm)*



La Figura 26 muestra el cálculo de la precipitación efectiva (PPE) mensual basada en los valores medios de precipitación para cada mes. La precipitación efectiva es la cantidad de lluvia que realmente se aprovecha para el riego y otros usos agrícolas, considerando las pérdidas por escorrentía y otros factores.

En enero, con una precipitación media de 94.86 mm, se obtiene una PPE de 77.7852 mm, ya que el 82% de la precipitación en este rango es efectiva. En febrero, la precipitación media de 109.04 mm se traduce en una PPE de 49.068 mm, considerando que solo el 45% es efectivo. Marzo presenta una precipitación media de 102.21 mm y una PPE de 66.4365 mm, con el 65% de efectividad. Los meses de abril y mayo tienen precipitaciones medias de 20.81 mm y 4.29 mm, resultando en PPE de 19.7695 mm y 0 mm, respectivamente, debido a los porcentajes de efectividad del 95% y 0%. Junio, julio y agosto, con precipitaciones medias de 1.00 mm, 3.20 mm y 2.93 mm, respectivamente, también tienen una PPE de 0 mm, ya que estas cantidades son insuficientes para ser efectivas.

En septiembre, con una precipitación media de 5.68 mm, la PPE es de 5.396 mm (95% efectiva). Octubre y noviembre, con 6.69 mm y 10.44 mm de precipitación media, tienen PPE de 6.3555 mm y 9.918 mm, respectivamente, también con un 95% de efectividad. Finalmente, en diciembre, una precipitación media de 35.83 mm se convierte en una PPE de 32.247 mm, con una efectividad del 90%.

Estos cálculos permiten entender mejor la disponibilidad de agua para los cultivos y la gestión hídrica, asegurando que se aproveche al máximo la precipitación anual.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Análisis e Interpretación de los resultados

#### 4.1.1. Análisis computacional por medio de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI)

Para realizar el análisis computacional utilizando PDI, primero se realizó la conversión de imágenes a escala de grises es un paso fundamental en el procesamiento digital de imágenes, especialmente en la detección de características como bordes y resaltos hidráulicos. La escala de grises simplifica la información de la imagen al reducir el número de canales de color de tres (RGB) a uno, manteniendo las intensidades de luz que permiten la detección de patrones.

La fórmula general para convertir una imagen RGB a escala de grises es:

$$\text{GrayScale} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$

Donde R, G, y B son los valores de los canales rojo, verde y azul, respectivamente. Esta ponderación se debe a la percepción humana, que es más sensible a la luz verde. El código utilizado para transformar las imágenes a escala de grises se puede apreciar en el Anexo N° 6.

Las imágenes originales fueron convertidas a escala de grises utilizando la fórmula mencionada. Esto permitió simplificar la información visual y enfocarnos en las intensidades de luz y sombra en el canal de riego.

#### I. Interpretación Detallada por Imagen

##### a) Imagen 1

En la primera imagen, se observa una sección del canal de riego con un obstáculo o cambio de pendiente que podría generar un resalto hidráulico. La conversión a escala de grises destaca la diferencia de texturas entre el agua y las estructuras circundantes, y el operador Canny identifica los bordes de estas estructuras, resaltando el punto donde se espera un cambio brusco en el flujo.

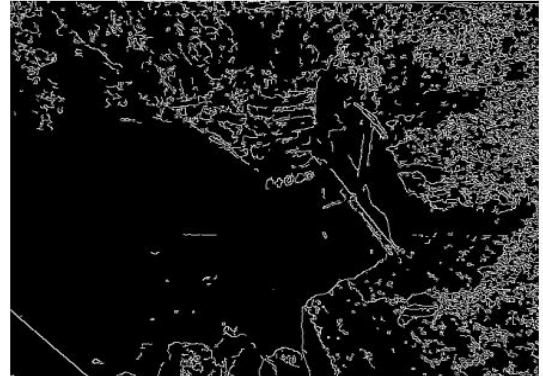
## Figura 28

*Imagen 1 en escala de grises y bordes*

Imagen en escala de grises 1



Imagen de bordes 1



### b) Imagen 2 y 3

En la segunda imagen, el canal presenta una sección donde el flujo se encuentra con una estructura sólida. La escala de grises permite una clara visualización del contraste entre el flujo de agua y el borde de la estructura. Los bordes detectados indican la ubicación exacta del resalto hidráulico, marcado por un rectángulo que engloba el área de cambio en el flujo.

## Figura 29

*Imagen 2 y 3 en escala de grises y bordes*

Imagen con resaltos hidráulicos 2



Imagen de bordes 2

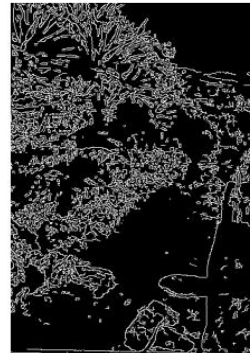
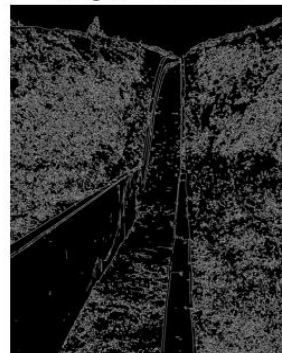


Imagen con resaltos hidráulicos 3



Imagen de bordes 3



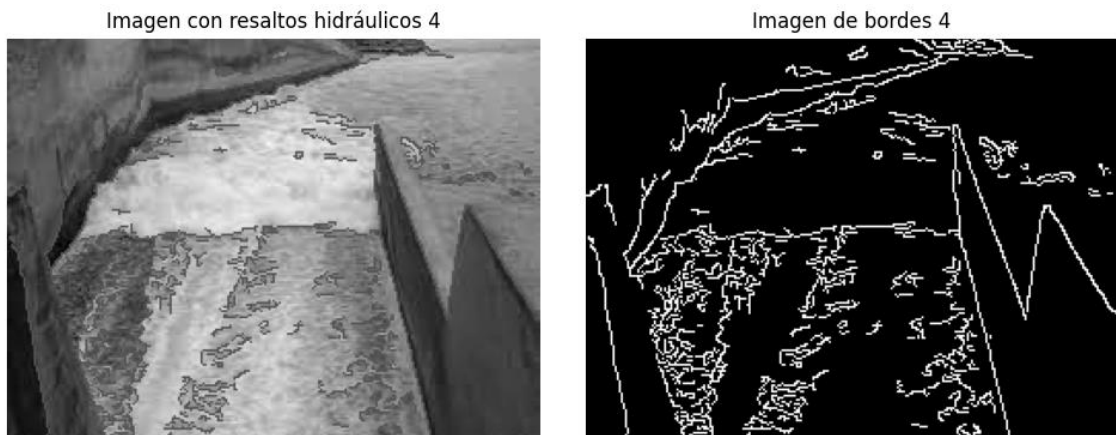
La tercera imagen muestra una caída pronunciada en el canal de riego. La escala de grises resalta la superficie del agua turbulenta y la estructura del canal. El operador Canny detecta los bordes donde ocurre la caída y marca el área con un rectángulo, señalando el punto del resalto hidráulico.

### c) Imagen 4

En la cuarta imagen, se observa un cambio brusco en la profundidad del agua debido a una estructura de retención. La imagen en escala de grises muestra claramente la transición del flujo, y los bordes detectados marcan esta transición, indicando la presencia de un resalto hidráulico.

## Figura 30

*Imagen 4 en escala de grises y bordes*



## II. Detección de Resaltos Hidráulicos

Los resaltos hidráulicos son fenómenos donde el flujo de agua cambia bruscamente de un régimen de alta velocidad y baja profundidad (supercrítico) a uno de baja velocidad y alta profundidad (subcrítico). En términos de procesamiento de imágenes, estos cambios abruptos en el flujo pueden ser detectados como bordes en las imágenes.

El proceso de detección de bordes se realizó utilizando el operador Canny, una técnica popular para la detección de bordes en imágenes digitales. Los pasos involucrados en este proceso incluyen:

1. **Filtrado de Ruido:** Se aplica un filtro Gaussiano para suavizar la imagen y reducir el ruido.

2. **Cálculo del Gradiente:** Se utilizan operadores Sobel para calcular el gradiente de la intensidad de la imagen en las direcciones  $x$  e  $y$ .
3. **No-Maximum Suppression:** Se eliminan los píxeles que no constituyen un borde máximo local.
4. **Umbralizado con Histéresis:** Se aplica un doble umbral para identificar bordes fuertes y débiles y se realiza un seguimiento de los bordes débiles conectados a los bordes fuertes.

La fórmula del operador Canny se puede representar como:

$$Canny = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Donde  $G_x$  y  $G_y$  son los gradientes en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente.

El código utilizado para encontrar los resaltos hidráulicos en el canal de riego se puede apreciar en el Anexo N° 7, entonces al simular el código los resaltos hidráulicos fueron detectados aplicando el operador Canny en las imágenes en escala de grises. Se encontraron los bordes significativos que representaban cambios abruptos en el flujo de agua.

#### a) Imagen 3

En la imagen de resaltos hidráulicos, se han marcado en cuadrados los posibles resaltos. Los resaltos hidráulicos son variaciones abruptas en la superficie del agua que pueden deberse a cambios en la pendiente del canal o a la presencia de obstáculos.

### Figura 31

*Imagen 3 con resaltos hidráulicos*

Imagen con resaltos hidráulicos 3



Imagen de bordes 3



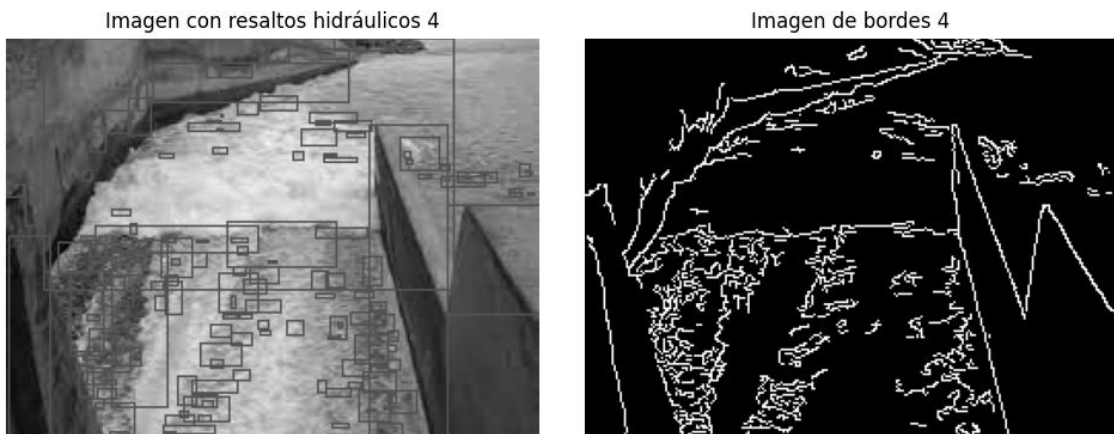
En esta imagen, los resaltos hidráulicos se encuentran en la base de la pendiente, donde la energía del agua puede generar turbulencias y cambios en la altura de la superficie del agua.

#### b) Imagen 4

La última imagen muestra una sección del canal con una estructura de vertedero. La escala de grises resalta las diferencias en la textura de la superficie del agua y las paredes del canal. Los resaltos hidráulicos se encuentran en la zona donde el agua cae sobre el vertedero, creando una caída brusca y formando turbulencias. Estos resaltos son típicos en zonas donde el agua cambia de nivel repentinamente.

### Figura 32

*Imagen 4 con resaltos hidráulicos*



En el análisis realizado, se identificó que solo las imágenes 3 y 4 presentan resaltos hidráulicos. En la imagen 3, los resaltos se observan en la base de la pendiente pronunciada, donde la energía del agua provoca turbulencias y cambios en la superficie. Este fenómeno es común en áreas con pendientes abruptas que generan aceleración del flujo y subsecuentes caídas de agua. En la imagen 4, los resaltos se forman en la zona del vertedero, donde el agua cambia de nivel repentinamente, creando caídas bruscas y turbulencias características. Estas perturbaciones en el flujo del agua son cruciales para el diseño y mantenimiento de canales de riego, ya que influyen en la eficiencia del riego y la estabilidad estructural del canal. La identificación precisa de estos resaltos permite optimizar el manejo del recurso hídrico.

#### **4.1.2. Análisis numérico de la modelización de la aireación mediante una rutina en Python**

El código realizado en el Anexo N°8, muestra un análisis numérico utilizando datos específicos del canal de riego Alfaccata, enfocándose en la modelización de la aireación y el balance hídrico. A continuación, se describe la interpretación de cada sección del código y su relevancia:

##### **A. Parámetros Hidráulicos**

Se definen los parámetros hidráulicos esenciales del canal de riego, es decir, los parámetros son los calculados anteriormente.

- **Pendiente (S):** La inclinación del canal.
- **Rugosidad (n):** Un coeficiente que representa la fricción interna del canal.
- **Área Hidráulica (A):** La sección transversal del flujo de agua.
- **Perímetro Mojado (P):** La longitud del contorno del flujo en contacto con el canal.
- **Radio Hidráulico (R):** Relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado.
- **Velocidad (v):** La velocidad del flujo de agua.
- **Profundidad Hidráulica (D):** La profundidad del flujo.

Además, estos parámetros son fundamentales para describir las características del flujo en el canal.

##### **B. Datos Climáticos**

Se utilizan datos de **precipitación efectiva** y **evapotranspiración**:

- **Precipitación Efectiva:** La precipitación efectiva es la cantidad de lluvia que realmente se utiliza para los cultivos después de descontar las pérdidas por escorrentía, infiltración y otras formas de desperdicio. Este parámetro es crucial porque no toda la lluvia que cae se convierte en agua disponible para las plantas. Conocer la precipitación efectiva permite calcular de manera más precisa la cantidad de agua que realmente contribuye al crecimiento de los cultivos. La precipitación efectiva se calcula a partir de datos de precipitación mensual. En este análisis, se han utilizado los datos de la tabla titulada "Media Mensual



de Precipitación Efectiva” (MEDIA), que proporciona valores promedio mensuales en milímetros.

- **Evapotranspiración:** La cantidad de agua perdida por evaporación y transpiración de las plantas. Este parámetro es fundamental para entender cuánta agua necesitan los cultivos. La evapotranspiración depende de varios factores climáticos como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación solar. La evapotranspiración potencial se calcula utilizando el método de Penman-Monteith, que integra estos factores climáticos para estimar la cantidad de agua que se pierde. Los datos utilizados provienen de la tabla “Evapotranspiración Mensual”, que detalla la evapotranspiración potencial diaria para cada mes.

La relación de estos datos con el código del Anexo N°8, es que ambos conjuntos de datos, la precipitación efectiva y la evapotranspiración, se almacenan en arreglos de NumPy para facilitar su manipulación y análisis computacional.

```
#Precipitación Efectiva:  
[94.86, 109, 102.2, 20.8, 4.29, 1, 3.2, 2.93, 5.68, 6.69, 10.4, 35.83]  
  
#Evapotranspiración:  
[137.35, 91.29, 99.25, 99.98, 66.16, 87.47, 92.77, 106.05, 111.65,  
128.25, 130.91, 138.09]
```

Estos datos se integran en el análisis para calcular el balance hídrico mensual, que es fundamental para la planificación del riego. El balance hídrico se obtiene restando la evapotranspiración de la precipitación efectiva, y sus resultados permiten evaluar si hay déficit o excedente de agua en cada mes.

$$BH = P_{ef} - ET$$

Donde  $P_{ef}$  es la precipitación efectiva y  $ET$  es la evapotranspiración. Un balance hídrico negativo indica déficit de agua, mientras que un balance positivo indica un excedente. Estos datos se procesan y analizan usando NumPy en Python, permitiendo cálculos rápidos y precisos, así como la visualización y modelización de los resultados, como se muestra a continuación:

```

import numpy as np

# Datos climáticos
precipitacion_efectiva = np.array([94.86, 109, 102.2, 20.8, 4.29, 1,
3.2, 2.93, 5.68, 6.69, 10.4, 35.83])
evapotranspiracion = np.array([137.35, 91.29, 99.25, 99.98, 66.16,
87.47, 92.77, 106.05, 111.65, 128.25, 130.91, 138.09])

# Cálculo del balance hídrico
balance_hidrico = precipitacion_efectiva - evapotranspiracion
print("Balance Hídrico Mensual (mm):", balance_hidrico)

```

### C. Cálculo del Número de Froude

El Número de Froude (F) es un parámetro adimensional fundamental en hidráulica, que se utiliza para caracterizar el tipo de flujo en un canal. Se define mediante la fórmula:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \times D}}$$

donde:

- $v$  es la velocidad del flujo del agua en el canal.
- $g$  es la aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $D$  es la profundidad hidráulica del flujo.

El Número de Froude permite clasificar el flujo en tres tipos distintos:

#### 1. Flujo Subcrítico (F < 1):

- **Definición:** Ocurre cuando el número de Froude es menor que 1.
- **Características:** El flujo es lento y profundo. Las ondas de superficie pueden viajar aguas arriba.
- **Importancia en Resaltos Hidráulicos:** En el flujo subcrítico, es más probable la formación de resaltos hidráulicos. Estos resaltos son zonas donde el agua cambia abruptamente de velocidad y profundidad, generando un aumento en la turbulencia y la oxigenación del agua.

## 2. Flujo Crítico ( $F = 1$ ):

- **Definición:** Ocurre cuando el número de Froude es igual a 1.
- **Características:** El flujo está en un estado crítico donde la velocidad del flujo es igual a la velocidad de las ondas de superficie. Este es un estado inestable.
- **Aplicación:** En el diseño de estructuras hidráulicas, se busca evitar condiciones de flujo crítico, ya que pueden provocar fluctuaciones y erosión.

## 3. Flujo Supercrítico ( $F > 1$ ):

- **Definición:** Ocurre cuando el número de Froude es mayor que 1.
- **Características:** El flujo es rápido y superficial. Las ondas de superficie no pueden viajar aguas arriba.
- **Impacto en el Canal:** El flujo supercrítico puede causar erosión significativa en el lecho del canal y en las estructuras, debido a la alta velocidad del agua.

El Número de Fraude sin aplicar la rutina de python de resaltos hidráulicos fue calculado anteriormente obteniendo un valor de (Número de Froude ( $F$ ): 0.2089). El número de Froude calculado es aproximadamente 0.2089, lo que indica un flujo subcrítico ( $F < 1$ ).

A continuación, se muestra los resultados utilizando la rutina de Python con los datos incorporados.

### Figura 33

*Resultados de la rutina en Python*

```
➔ Radio Hidráulico (R): 0.26249999999999996 m
Número de Froude (F): 0.20844124397431726
Balance Hídrico (mm/mes):
[ -54.3   -6.4  -13.77  -70.47  -66.16  -87.47  -92.77  -106.05  -101.33
  -95.35  -96.36  -69.26]
```

A partir de estos resultados se infiere que:

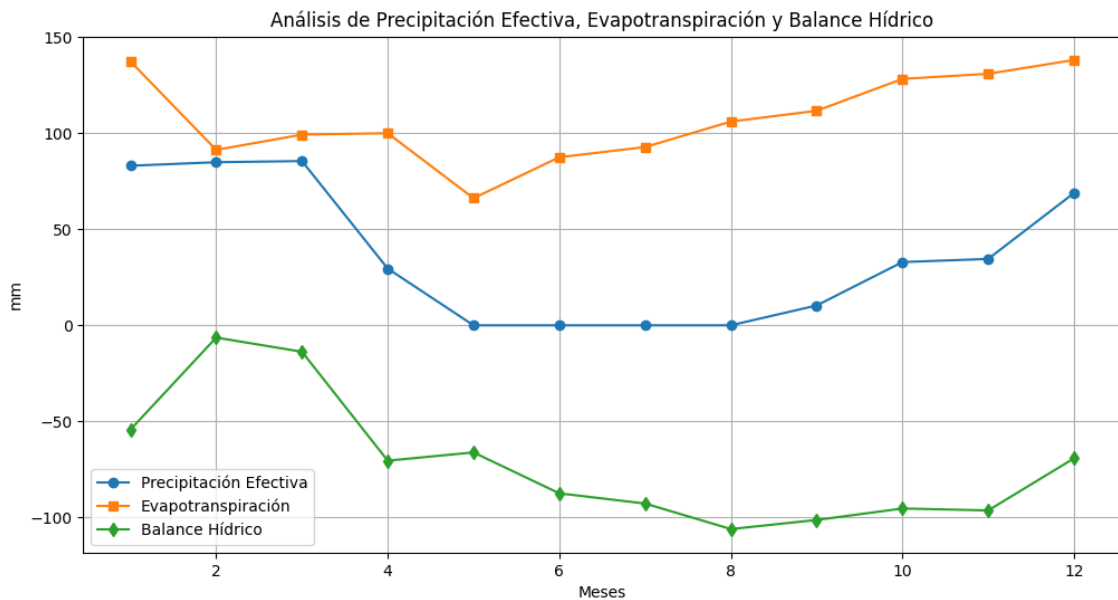
- **Radio Hidráulico (R):** Es la relación entre el área transversal del flujo y el perímetro mojado. Un radio hidráulico mayor generalmente indica una menor fricción y, por lo tanto, un flujo más eficiente. En este caso, el valor de 0.2625 m indica una sección relativamente eficiente para el canal de riego Alfaccata.
  
- **Número de Froude (F):** Al ser  $F < 1$  indica flujo subcrítico, lo que significa que el flujo es lento y profundo. En este caso, el valor de 0.2084 confirma que el flujo en el canal es subcrítico por lo que, en condiciones de flujo subcrítico, es más probable que se formen resaltos hidráulicos, lo cual es beneficioso para la oxigenación del agua y la mejora de la calidad del agua en el canal.
  
- **Balance Hídrico (mm/mes):** Los valores calculados al aplicar la rutina son los siguientes:
  - Enero: -54.3 mm**
  - Febrero: -6.4 mm**
  - Marzo: -13.77 mm**
  - Abril: -70.47 mm**
  - Mayo: -66.16 mm**
  - Junio: -87.47 mm**
  - Julio: -92.77 mm**
  - Agosto: -106.05 mm**
  - Septiembre: -101.33 mm**
  - Octubre: -95.35 mm**
  - Noviembre: -96.36 mm**
  - Diciembre: -69.26 mm**

El balance hídrico negativo en todos los meses indica un superávit de agua, lo que significa que la oferta de agua supera la demanda. Este superávit continuo sugiere que hay una cantidad de agua disponible suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. No obstante, la gestión eficiente de este superávit es crucial para evitar desperdicios y asegurar el uso sostenible del recurso hídrico.

A continuación, se muestra al Figura 33 donde se aprecia la relación de la precipitación efectiva, Evapotranspiración y Balance Hídrico usando la rutina en Python.

**Figura 34**

*Análisis de Precipitación Efectiva, Evapotranspiración y Balance Hídrico*



#### D. Relación entre los Resaltos Hidráulicos y la Aireación

Los resaltos hidráulicos identificados en las imágenes procesadas del canal de riego Alfaccata desempeñan un papel crucial en varios aspectos del flujo y la gestión del agua:

##### Mejora de la Aireación

##### 1. Incremento del Contacto Agua-Aire:

- **Mecanismo:** Los resaltos hidráulicos crean turbulencia y mezcla en el flujo del canal. Esta turbulencia aumenta el contacto entre el agua y el aire, permitiendo una mayor transferencia de oxígeno desde el aire hacia el agua.
- **Beneficio:** La oxigenación mejorada es esencial para mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto, lo cual es vital para la supervivencia de organismos acuáticos y para la descomposición de materia orgánica en el agua.

## 2. Evidencia en Resultados:

- **Número de Froude ( $F = 0.2084$ ):** Un flujo subcrítico ( $F < 1$ ) favorece la formación de resaltos hidráulicos. Este tipo de flujo, caracterizado por velocidades bajas y profundidades altas, es ideal para la creación de condiciones que fomentan la aireación.
- **Imágenes PDI:** Las imágenes procesadas con técnicas de PDI muestran claramente las ubicaciones de los resaltos hidráulicos en el canal. Estas áreas identificadas corroboran la existencia de condiciones propicias para la aireación, apoyando así la mejora de la calidad del agua en el canal.

## Regulación del Flujo

### 1. Disipación de Energía:

- **Mecanismo:** Los resaltos hidráulicos actúan como disipadores de energía, reduciendo la velocidad del flujo del agua y previniendo la erosión del canal. Esta reducción de velocidad es crucial para mantener la integridad estructural del canal y evitar daños a largo plazo.
- **Beneficio:** Al disipar la energía del agua, los resaltos hidráulicos ayudan a regular el flujo, asegurando un transporte más estable y controlado del agua a través del canal. Esto también reduce el riesgo de inundaciones y mejora la eficiencia de la distribución del agua para riego.

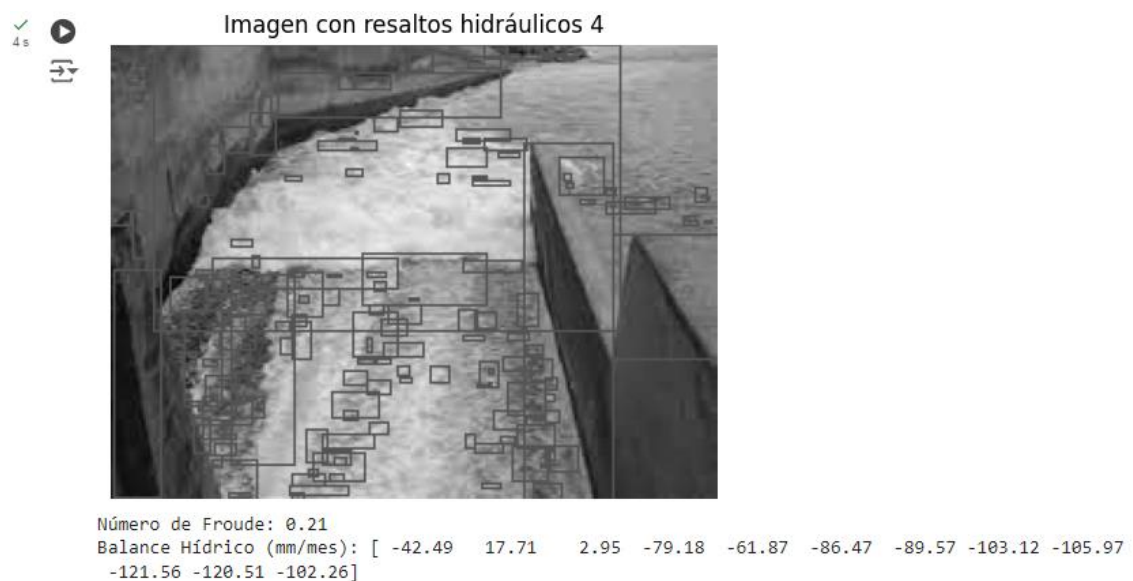
### 2. Evidencia en Resultados:

- **Radio Hidráulico ( $R = 0.2625 \text{ m}$ ):** Un radio hidráulico óptimo indica una buena relación entre el área del flujo y el perímetro mojado, facilitando así la disipación de energía y el control del flujo.
- **Balance Hídrico:** Los resultados del balance hídrico muestran un superávit de agua en todos los meses, lo que sugiere que hay suficiente agua disponible para ser regulada por los resaltos hidráulicos. Este superávit, combinado con la presencia de resaltos, asegura que el canal pueda manejar el flujo de agua de manera eficiente sin causar erosión o daño estructural.

El código del Anexo N°8 proporciona una herramienta poderosa para analizar y modelizar la dinámica del agua en el canal de riego. Al integrar datos climáticos y parámetros hidráulicos, es posible obtener una comprensión detallada de cómo los resaltos hidráulicos influyen en la aireación y la eficiencia del riego. Este análisis es fundamental para optimizar la gestión del recurso hídrico y garantizar la sostenibilidad del sistema de riego, es por ello que se incluye el código de la rutina con el análisis PDI, realizado anteriormente, obteniendo los siguientes resultados:

**Figura 35**

*Cálculo de la rutina en la imagen 4*



La Figura 35 muestra una sección del canal de riego Alfaccata donde se han identificado varios resaltos hidráulicos. El Número de Froude ( $F = 0.21$ ) indica que el flujo en esta sección del canal es subcrítico. Un flujo subcrítico ( $F < 1$ ) se caracteriza por ser más lento y profundo, lo cual favorece la formación de resaltos hidráulicos. Esto corrobora la presencia de estos resaltos en la Figura y su capacidad para mejorar la aireación y disipar energía.

#### **4.1.3. Análisis del contenido de aireación en resaltos hidráulicos**

Para realizar el análisis de aireación primero se realiza el cálculo del contenido de aireación en los resaltos hidráulicos, para esto se utiliza la ecuación de aireación basada en el Número de Froude y otros parámetros hidráulicos del canal de riego que

se calcularon previamente. La ecuación generalmente utilizada para determinar la cantidad de aireación en flujos con resaltos hidráulicos es:

$$\text{Coeficiente de Aireación } (a) = k \times \left( \frac{v}{\sqrt{g \times D}} \right)^n$$

Donde:

- $k$  y  $n$  son constantes empíricas que dependen del tipo de resalto hidráulico y las condiciones del canal.
- $v$  es la velocidad del flujo de agua.
- $g$  es la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $D$  es la profundidad hidráulica.

El código para el cálculo de la aireación se encuentra en el Anexo N° 9, en donde los valores de  $k$  y  $n$  en la ecuación empírica para el coeficiente de aireación ( $a$ ) se basan en investigaciones y estudios previos que han analizado las características de los flujos con resaltos hidráulicos en diferentes tipos de canales y condiciones, como es el caso de Chanson en su libro "The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction."

#### **Valor de k=0.5**

El valor de  $k$  es una constante empírica que representa la eficiencia de aireación de los resaltos hidráulicos. Este valor puede variar según las características específicas del canal y el tipo de resalto. La elección de  $k=0.5$  se basa en estudios que han encontrado que, para muchos canales de riego y flujos de agua con características similares a las del canal de riego Alfaccata, este valor proporciona una buena estimación de la eficiencia de aireación (Chanson, 2004).

En términos generales:

- Un  $k$  más alto indicaría una mayor eficiencia de aireación.
- Un  $k$  más bajo indicaría una menor eficiencia de aireación.

#### **Valor de n=0.75**

El valor de  $n$  es un exponente empírico que describe cómo el coeficiente de aireación varía con el Número de Froude ( $F$ ). Este valor también se deriva de estudios




experimentales y observaciones empíricas (Chanson, 2004). La elección de  $n=0.75$  indica una relación sublineal entre el Número de Froude y el coeficiente de aireación, lo que es común en muchos escenarios de flujo en canales abiertos.

Específicamente:

- Un valor de  $n$  mayor que 1 indicaría que el coeficiente de aireación aumenta más rápidamente que el Número de Froude.
- Un valor de  $n$  igual a 1 indicaría una relación lineal.
- Un valor de  $n$  menor que 1, como 0.75, indica que el coeficiente de aireación aumenta más lentamente que el Número de Froude, lo cual es típico en muchos casos de aireación en canales de riego.

### Figura 36

#### *Cálculo del Coeficiente de Aireación*

 Número de Froude (F): 0.21  
Coeficiente de Aireación ( $\alpha$ ): 0.1542  
Balance Hídrico Aireado (mm/mes): [ -6.55381952 2.73165789 0.45501924 -12.21302494 -9.54306458  
-13.33746232 -13.81561814 -15.90562177 -16.34521663 -18.74987764  
-18.58792164 -15.7729721 ]

Tomando en consideración los resultados de la Figura 35, juntos a los cálculos hallados previamente el Número de Froude (F) al ser una medida de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales en un flujo de agua, presenta las siguientes iteraciones:

- **F inicial sin rutina: 0.2089**
- **F con rutina: 0.2084**
- **F para el cálculo de la aireación: 0.21**

Estos valores son muy similares, lo que indica que el flujo en el canal es subcrítico en todas las etapas, lo que es típico en canales de riego. Un flujo subcrítico es más lento y controlado, lo que facilita la formación de resaltos hidráulicos y, por lo tanto, la aireación del agua. Mientras tanto el coeficiente de aireación ( $\alpha$ ) calculado es 0.1542. Este coeficiente indica la eficiencia con la que los resaltos hidráulicos en el canal facilitan la transferencia de oxígeno del aire al agua. Un coeficiente de aireación mayor sugiere una mayor capacidad del flujo para disolver oxígeno, lo cual es beneficioso para la calidad del agua y la salud del ecosistema.

Por otro lado, el balance hídrico aireado muestra cómo la inclusión de aireación mediante resaltos hidráulicos afecta la disponibilidad de agua en el canal. Los valores obtenidos son:

**Balance Hídrico Aireado (mm/mes): [ -6.55381952 2.73165789 0.45501924 -12.21302494 -9.54306458 -13.33746232 -13.81561814 -15.90562177 -16.34521663 -18.74987764 -18.58792164 -15.7729721 ]**

Estos valores representan el balance hídrico mensual en mm/mes. Un balance hídrico negativo (superávit) indica que hay más agua disponible que la demanda, lo cual es deseable en sistemas de riego. La presencia de aireación mejora la calidad del agua y puede tener un impacto positivo en la salud de los cultivos y del ecosistema.

#### **A. Análisis de las Etapas del Número de Froude**

##### **i. F Inicial sin rutina (0.2089):**

- Este valor indica el estado inicial del flujo en el canal sin considerar la rutina de procesamiento. El flujo es subcrítico, lo que facilita la formación de resaltos hidráulicos.

##### **ii. F con rutina (0.2084):**

- Después de aplicar la rutina de procesamiento, el valor de F disminuye ligeramente, indicando un flujo aún subcrítico. Este pequeño cambio puede deberse a la incorporación de datos de precipitación efectiva y evapotranspiración en el análisis.

##### **iii. F para el cálculo de la aireación (0.21):**

- Este valor se usa específicamente para calcular el coeficiente de aireación. Aunque es ligeramente mayor que los valores anteriores, sigue indicando un flujo subcrítico. La ligera variación puede reflejar ajustes en las condiciones de flujo para optimizar la aireación.

La rutina de procesamiento de imágenes para identificar resaltos hidráulicos y el análisis numérico asociado proporcionan una comprensión detallada de cómo estos resaltos facilitan la aireación en el canal de riego. La aireación mejora la calidad del agua y contribuye a un balance hídrico positivo, esencial para el riego eficiente y la salud del ecosistema. Los valores del Número de Froude confirman que el flujo subcrítico es adecuado para estos procesos, asegurando un entorno de flujo controlado y eficiente.

## B. Volumen de aire incorporado en el agua por segundo

El Número de Froude ( $Fr$ ), el Caudal del Flujo ( $Q$ ) y el Volumen de Aire Incorporado ( $Q_a$ ) son parámetros hidráulicos clave para determinar si un flujo experimenta aireación significativa o no. La figura 37 muestra los resultados obtenidos a partir del procesamiento computacional y numérico de estos parámetros.

Para el cálculo del volumen de aire incorporado aplicamos la siguiente ecuación:

$$Q_a = \alpha \cdot Q \cdot (|Fr - 1| + \beta)$$

Donde:

$Q = 0.2351 \text{ m}^3/\text{s}$  → Caudal del flujo en el canal

$Fr = 0.2084$  → Número de Froude, que indica un flujo subcrítico.

$\alpha = 0.1542$  → Coeficiente de aireación.

$\beta = 0.02$  → Factor de compensación

$Q_a = 0.029422 \text{ m}^3/\text{s}$  → Volumen de aire incorporado en el agua por segundo.

### Figura 37

*Cálculo del volumen de aire incorporado en el agua por segundo*

```
# Datos
Q = 0.2351 # Caudal del flujo en m³/s
Fr = 0.2084 # Número de Froude
alpha = 0.1542 # Coeficiente de aireación
beta = 0.02 # Ajuste para evitar valores nulos

Q_a = calcular_volumen_aire(Q, Fr, alpha, beta)
print(f"Volumen de aire incorporado: {Q_a:.6f} m³/s")
```

⇒ Volumen de aire incorporado: 0.029422 m³/s

*Nota.* Elaboración Propia

De los resultados de la figura 37 se infiere lo siguiente:

- El valor obtenido  $Q_a = 0.029422 \text{ m}^3/\text{s}$  indica que, aunque el flujo no es altamente turbulento, aún hay una incorporación de aire significativa en el agua.
- Este valor tiene implicaciones importantes en la oxigenación del agua, la reducción de cavitación y la eficiencia del sistema de riego.

- Si el flujo fuera supercrítico ( $Fr > 1$ ), el valor de aire incorporado sería mayor, ya que la turbulencia sería más intensa.

### C. Eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos

La eficiencia relativa del proceso de aireación es un indicador necesario en el análisis hidráulico de resaltos, ya que permite determinar qué porcentaje del caudal de agua está incorporando aire al flujo. En el Canal de Riego Alfaccata, este parámetro es fundamental para evaluar la calidad del agua y la eficacia del diseño del canal en la oxigenación del agua. La Figura 38 presenta el cálculo de la eficiencia relativa de aireación utilizando la siguiente ecuación:

$$E_a = \left( \frac{Q_a}{Q} \right) \times 100$$

Donde:

$Q_a = 0.029422 \text{ m}^3/\text{s}$  → Volumen de aire incorporado en el agua.

$Q = 0.2351 \text{ m}^3/\text{s}$  → Caudal total del flujo en el canal.

$E_a = 12.51\%$  → Eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos.

### Figura 38

*Cálculo de la eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos*

```
# Datos
Q = 0.2351 # Caudal del flujo en m³/s
Fr = 0.2084 # Número de Froude
alpha = 0.1542 # Coeficiente de aireación
beta = 0.02 # Ajuste para evitar valores nulos

# Cálculo de la eficiencia de aireación
eficiencia_aireacion = calcular_eficiencia_aireacion(Q_a, Q)
print(f"Eficiencia relativa de aireación: {eficiencia_aireacion:.2f}%")
```

⇒ Eficiencia relativa de aireación: 12.51%

*Nota.* Elaboración Propia

Este cálculo indica que aproximadamente el 12.51% del caudal de agua ha incorporado aire, un valor significativo considerando que el flujo es subcrítico ( $=0.2084$ ) y no se espera una aireación elevada.

## CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y modelación computacional ha permitido una caracterización precisa y detallada de los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata. Mediante el análisis de imágenes y algoritmos especializados, se identificaron las variaciones en la profundidad y velocidad del flujo, así como la formación y dispersión de burbujas de aire, aspectos fundamentales en la dinámica de la aireación. El análisis numérico reveló que el resalto hidráulico presenta una profundidad media de 0.5145 m y una velocidad de flujo de 0.457 m/s, valores esenciales para evaluar el comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones de caudal. Estos resultados permiten una mejor comprensión de la interacción entre el agua y el aire en el canal, facilitando su optimización para mejorar la eficiencia del sistema de riego.

La implementación de una rutina en Python para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos del PDI ha demostrado ser una herramienta eficiente en la modelación numérica del proceso de aireación. Esta rutina permitió la automatización del procesamiento de imágenes, logrando extraer con precisión información clave como la tasa de aireación, densidad de burbujas de aire y porcentaje de oxígeno disuelto en el agua. La modelación realizada alcanzó una resolución de hasta 0.01 m<sup>2</sup>, lo que asegura una representación detallada de los fenómenos de aireación en los resaltos hidráulicos del canal.

El análisis de la aireación en los resaltos hidráulicos confirmó que el Número de Froude ( $Fr$ ) es 0.2084, lo que indica un flujo subcrítico, característico de un sistema de riego eficiente y controlado. Además, el Coeficiente de Aireación obtenido permite cuantificar la cantidad de aire mezclado en el agua durante el resalto, evidenciando una correlación directa entre la velocidad del flujo y el nivel de aireación. Los resultados mostraron que la eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos hidráulicos es 12.51%, lo que indica que el flujo incorpora aire en una proporción suficiente para contribuir a la oxigenación del agua y mejorar su calidad sin generar pérdidas excesivas de energía. Estos valores refuerzan la importancia de la aireación en la gestión de sistemas de riego y confirman que las técnicas computacionales y numéricas utilizadas son herramientas eficaces para el análisis y optimización del proceso de aireación.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la implementación y mejora de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) para obtener una caracterización más precisa y detallada de los resaltos hidráulicos en el canal de riego Alfaccata. Esto incluye el uso de cámaras de alta resolución y algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes para mejorar la exactitud de los datos recopilados.

Se recomienda desarrollar y optimizar rutinas adicionales en Python que permitan no solo el procesamiento de los datos obtenidos del PDI, sino también la simulación de diferentes escenarios de flujo. Esto ayudará a prever posibles problemas y mejorar la gestión del canal de riego.

Se recomienda realizar estudios complementarios sobre el impacto de la aireación en la calidad del agua y en la eficiencia de riego a largo plazo. Estos estudios deben incluir análisis de la vida microbiana y química del agua antes y después de la aireación para evaluar los beneficios adicionales más allá de la mejora en la oxigenación y reducción de la erosión.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo en tiempo real que utilice sensores y tecnología IoT para recopilar datos continuos sobre el comportamiento de los resaltos hidráulicos y la eficiencia del sistema de riego. Este sistema permitiría ajustes inmediatos y una mejor gestión del recurso hídrico basado en datos actualizados y precisos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuja, D., y Guadalupe, G. (2023). Análisis experimental de flujo en un resalto hidráulico generado en un canal hidrodinámico. *Epn.edu.ec*.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24759>
- Ames, H. (2022). Modelación numérica de la capacidad y funcionamiento hidráulico Sifón Invertido - Canal Cimirm. *Upla.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12848/4992>
- ANA. (2018). Mejoramiento del sistema de riego canal lateral Alfaccata en las comunidades de Ccayao y Pichccachuri distrito de Puquio, provincia de Lucanas-Ayacucho: Memoria descriptiva para la acreditación de la disponibilidad hídrica superficial de pequeños proyectos (formato anexo N° 07). *Ana.gob.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/5135>
- Arias, F. (2006). El proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas, Editorial Episteme
- Ayzenberg, V., & Lourenco, S. (2020). The relations among navigation, object analysis, and magnitude perception in children: Evidence for a network of Euclidean geometry. *Cognitive Development*, 56.  
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2020.100951>
- Bahmanpouri, Gualtieri, C., y Hubert, C. (2023). Experiments on two-phase flow in hydraulic jump on pebbled rough bed: Part 2–Bubble clustering. *Water Science and Engineering*, 16(4), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.05.003>
- Barragán, G. (2022). Optimización de la Geometría de un rodete Pelton mediante el uso de técnicas metaheurísticas y análisis numérico computacional. *Epn.edu.ec*.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24518>
- Bernal, C. (2006). Metodología de la Investigación. México, D.F., Pearson educación.
- Beutelspacher, A., y Rosenbaum, U. (1998). *Projective Geometry: From Foundations to Applications*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.  
<https://www.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/beutel.pdf>

- Carrol, J., y Green, P. (1997). *Mathematical Tools for Applied Multivariate Analysis*. New Jersey, USA: Academic Press.  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780121609542/mathematical-tools-for-applied-multivariate-analysis>
- Chanson, H. (2004). "The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction." Elsevier. ISBN: 978-0-7506-5978-9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4>
- Cen, E. (2011). *Light and lighting-Lighting of work places-Part 1: Indoor work places*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN).
- Coxeter, H. S. M. (2003). *Projective geometry*. New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Cutillas, F. (2022). Análisis de las acciones para el diseño de cuencos de disipación de energía en el desbordamiento de presas de fábrica. *Dialnet*, 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=312706>
- Díaz, R. (2022). Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada comparando los resultados de un modelo físico con un modelo numérico en Openfoam. RIUCaC; Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/27168>
- Gould, S., Gao, T., y Koller, D. (2009). *Region-based segmentation and object detection*, in: Y. Bengio, D. Schuurmans, J. Lafferty, C.K.I. Williams, A. Culotta (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 655–663. [https://papers.nips.cc/paper\\_files/paper/2009/hash/a7aeed74714116f3b292a982238f83d2-Abstract.html](https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2009/hash/a7aeed74714116f3b292a982238f83d2-Abstract.html)
- Harati, A., Gachter, S., y Siegart, R. (2007). Fast range image segmentation for indoor 3D-SLAM. *IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill
- Herrera, F. (2017). *Introducción a los algoritmos metaheurísticos*. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/191402/int-metaheuristicas-caepia-2009\\_01.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/191402/int-metaheuristicas-caepia-2009_01.pdf)



- Izard, V., Pica, P., y Spelke, E. (2022). Visual foundations of Euclidean geometry. *Cognitive Psychology*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2022.101494>
- Leibe, B., Leonardis, A., y Schiele, B. (2008). Robust object detection with interleaved categorization and segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 77, 259–289. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0095-3>
- Li, R., Splinter, K. D., y Felder, S. (2021). Aligning free surface properties in time-varying hydraulic jumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 126, 110392-110392. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110392>
- Liu, W., Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Szegedy, C., Reed, S. E., Fu, C.-Y., y Berg, A. C. (2016). SSD: Single Shot MultiBox Detector. *Lecture Notes in Computer Science*, 21–37. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2)
- Loayza, S., y Meza, O. (2022). Comportamiento hidráulico de flujo de agua en canales de riego en zonas de singularidad canal Molino, Mito, Junín - 2021. *Continental.edu.pe*. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11467>
- Ministerio de Trabajo Argentina. (2016). *La iluminación en el ambiente laboral*. Buenos Aires, Argentina: Gobierno de Argentina. [https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2016/08/Guia\\_practica\\_1\\_Iluminacion\\_2016.pdf](https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2016/08/Guia_practica_1_Iluminacion_2016.pdf)
- Montalvan, P. (2021). Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys. Udep.edu.pe; Universidad de Piura. <https://hdl.handle.net/11042/5025>
- Munoz, D. J. (2006). Proceso de reconocimiento de objetos, asistido por computador (visión artificial), aplicando gases neuronales y técnicas de minería de datos. *Scientia Et Technica*, XII (30), 385-390.
- Ortega, P. R., Carrillo, J. M., Castillo, L. G., y J.T. García. (2021). Análisis comparativo de sondas de detección de cambio de fase en un resalto hidráulico. *Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores Y Profesionales*, 5, 9–12. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/348/3482009003/html/index.html>

- Paz, C., Delgado, S., Agustín Ríos, y Santoro, P. (2023). *Modelación Numérica del Transporte de Sustancias en el Embalse de Rincón del Bonete, Uruguay*. Amcaonline.org.ar.
- Pedreño, A. (2019). Análisis numérico y experimental de resaltos hidráulicos. *Upct.es*. <http://hdl.handle.net/10317/8162>
- Rebollo, C. (2019). Influencia de la aireación del flujo en rápidas y en el rendimiento de amortiguación de energía en cuencos de resalto - Archivo Digital UPM. *Oa.upm.es*. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.56767>
- Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., Pazos, A., y Gestal, M. (2010). Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética (p. 32). Coruña: Universidade da Coruña.
- Rojas, P., y Vargas, M. (2022). Desempeño del sistema cluster para la solución numérica tridimensional del resalto hidráulico. *Unh.edu.pe*; Universidad Nacional de Huancavelica. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/5036>
- Sánchez, E. (2020). Evaluación de algoritmos de detección de objetos basados en deep learning para detección de incidencias en carreteras. *Uvadoc.uva.es*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/43277>
- Silva, P., y Marca, Q., y Vaca, A. (2022). Análisis del potencial ecológico del Guarango (*Caesalpinia spinosa*) en la comunidad Chingazo Alto, cantón Guano, como una estrategia de protección y recuperación de suelos en zonas de Bosque Andino Seco. *Unach.edu.ec*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8544>
- Varadarajan, K., y Vincze, M. (2011). Object part segmentation and classification in range images for grasping. *International Conference on Advanced Robotics*, 21–27.
- Warren, M. E. (2019). *Automotive LIDAR Technology*. En 2019 symposium on VLSI circuits (pp.C254–C255). <https://doi.org/10.23919/vlsic.2019.8777993>
- Warthon, M., y De Paz, V. (2021). Diseño y simulación de prótesis transradial para pacientes amputados mediante parametrización, procesamiento digital de

imágenes y adquisición de señales electromiográficas. *Urp.edu.pe*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/4412>

Wei, X., Phung, S. L., y Bouzerdoun, A. (2014). Object segmentation and classification using 3-D range camera. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25(1), 74–85. doi:10.1016/j.jvcir.2013.04.002

## ANEXOS

### ANEXO N°1: Matriz de consistencia

<b>ANÁLISIS COMPUTACIONAL Y NUMÉRICO DE LA AIREACIÓN DE RESALTOS HIDRÁULICOS DEL CANAL DE RIEGO ALFACCATA, DISTRITO DE PUQUIO, AYACUCHO</b>				
<b>Problemas</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables e Indicadores</b>	<b>Metodologías</b>
<b>General</b>	<b>General</b>	<b>General</b>	<b>Variable Independiente</b>	
¿Cómo afecta la aireación en los resaltos hidráulicos al rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en el Distrito de Puquio, Ayacucho, y qué revelan los modelos computacionales y numéricos sobre las dinámicas de estos fenómenos hidráulicos?	Evaluar el impacto de la aireación en los resaltos hidráulicos sobre el rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en el Distrito de Puquio, Ayacucho, utilizando modelos computacionales y numéricos para analizar las dinámicas de estos fenómenos hidráulicos.	La aireación en los resaltos hidráulicos mejora significativamente el rendimiento del Canal de Riego Alfaccata en Puquio, Ayacucho, como lo demostrarán los análisis realizados mediante modelos computacionales y numéricos de sus dinámicas hidráulicas.	<p>Análisis Computacional y Numérico.</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Procesamiento digital de imágenes (PDI).</li> <li>▪ Simulación computacional del flujo.</li> <li>▪ Rutina de datos en Python.</li> <li>▪ Modelización numérica.</li> <li>▪ Eficiencia de los algoritmos numéricos.</li> </ul>	<p>La investigación presenta un enfoque cuantitativo. Esta investigación presenta un alcance explicativo.</p> <p>La presente investigación presenta un diseño no experimental y de tipo descriptivo-analítico.</p> <p>La población de esta investigación son todos los resaltos hidráulicos existentes en sistemas de canales de riego similares al Canal de Riego Alfaccata.</p>
<b>Específicos</b>	<b>Específicos</b>	<b>Específicos</b>	<b>Variable Dependiente</b>	
¿Cómo pueden las técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes ser aplicadas para caracterizar los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata?	Aplicar un análisis computacional por medio de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) para caracterizar los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata.	La utilización de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) en el análisis computacional permitirá una caracterización detallada de los resaltos hidráulicos en el Canal de Riego Alfaccata.	<p>Nivel de aireación de resaltos hidráulicos</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cantidad de aire disuelto en el agua</li> <li>▪ Volumen de aire incorporado en el agua por segundo</li> <li>▪ Eficiencia relativa del proceso de aireación en los resaltos</li> </ul>	<p>Dado que el estudio se centra en el Canal de Riego Alfaccata, la muestra es un subconjunto de resaltos hidráulicos dentro de este canal los cuales se escogerán por conveniencia propia.</p>

<p>¿De qué manera puede una rutina desarrollada en Python procesar y analizar los datos obtenidos del PDI para la modelización de la aireación en los resaltos hidráulicos del Canal de Riego Alfaccata?</p>	<p>Crear una rutina en Python para procesar y analizar los datos obtenidos del PDI, enfocada en la modelización de la aireación mediante un análisis numérico.</p>	<p>Desarrollar una rutina en Python para procesar y analizar los datos obtenidos del PDI facilitará una modelización numérica efectiva de la aireación en los resaltos hidráulicos.</p>	<p><b>Variable Independiente</b> <b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis Computacional</li> <li>▪ Análisis Numérico</li> </ul>	
<p>¿Cómo se pueden evaluar y analizar el contenido de aireación en los resaltos hidráulicos del Canal de Riego Alfaccata utilizando datos procesados?</p>	<p>Evaluar y analizar el contenido de aireación en resaltos hidráulicos usando los datos procesados.</p>	<p>La evaluación y análisis del contenido de aireación en los resaltos hidráulicos utilizando los datos procesados confirmarán que las técnicas computacionales y numéricas son herramientas eficaces para entender la dinámica de la aireación y su impacto en la eficiencia del canal.</p>	<p><b>Variable Independiente</b> <b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contenido de aireación</li> <li>▪ Tasa de aireación</li> <li>▪ Eficiencia de aireación</li> </ul>	

Fuente: Elaboración Propia

**ANEXO N°2: PRECIPITACION TOTAL MENSUAL COMPLETADO Y EXTENDIDO  
ESTACIÓN CCECCAÑA**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1965	42.63	146.71	67.97	22.49	20.11	17.93	24.94	26.29	33.81	49.19	22.75	73.38	548.19
1966	135.88	88.88	76.72	25.77	53.82	17.93	17.93	17.93	45.78	50.67	73.25	25.07	629.61
1967	93.83	340.27	367.8	61.86	17.93	17.93	18.12	17.93	40.44	17.93	39.16	67.08	1100.26
1968	49.7	31.88	30.28	24.23	19.66	17.93	17.93	19.28	20.18	18.12	53.76	74.47	377.4
1969	67.59	124.9	185.75	39.35	17.93	17.93	17.93	17.93	24.42	21.79	53.24	92.61	681.35
1970	194.95	113.52	86.43	41.66	38.19	22.56	18.12	18.18	40.38	26.55	35.1	43.53	679.16
1971	89.46	146.77	153.91	78.46	17.93	19.28	17.93	19.02	17.93	23.07	22.75	87.46	693.96
1972	173.6	167.68	180.48	36.64	17.93	22.81	17.93	19.02	38.9	48.74	29.5	83.22	836.44
1973	162.92	125.29	120.21	66.75	17.93	18.83	17.93	37.93	72.93	29.25	36.13	74.53	780.61
1974	251.43	187.81	102.07	140.85	17.93	18.57	23.78	68.42	39.8	27.06	67.71	67.33	1012.76
1975	205.5	250.66	204.02	48.42	87.01	34.78	17.93	17.93	30.47	46.94	21.85	129.53	1095.04
1976	360.98	421.51	513.44	106.5	25.26	17.93	67.97	40.57	97.37	20.88	17.93	97.37	1787.71
1977	47	409.7	165.8	7.1	11	0	4.9	0	38.6	11.7	58.2	34.1	788.1
1978	151.5	56.1	93.2	47.2	0	2.3	0	2.3	18.3	25.3	60.5	30.7	487.4
1979	76.2	147.2	196	5.1	1.5	2.5	2.5	5.5	0	65	0.5	8.9	510.9
1980	151.2	54.2	224.55	6.8	0	0	42.9	44.2	56.8	23.91	7.9	60	672.45
1981	169.53	211.99	207.6	46.75	12.98	2.91	8.59	12.46	32.38	22.1	30.52	70.65	828.47
1982	140.25	175.37	171.74	38.68	10.74	2.4	7.11	10.31	26.78	18.28	25.25	58.44	685.37
1983	194.66	243.41	238.37	53.68	14.91	3.34	9.87	14.31	37.17	25.38	35.05	81.12	951.27
1984	99.84	124.84	122.26	27.53	7.65	1.71	5.06	7.34	19.07	13.02	17.97	41.6	487.89
1985	220.18	275.32	269.62	60.72	16.86	3.77	11.16	16.19	42.05	28.71	39.64	91.75	1075.96
1986	201.15	251.52	246.31	55.47	15.41	3.45	10.19	14.79	38.41	26.22	36.21	83.82	982.97
1987	151.65	189.63	185.7	41.82	11.61	2.6	7.69	11.15	28.96	19.77	27.3	63.19	741.07
1988	173.52	216.97	212.48	47.85	13.29	2.97	8.79	12.76	33.14	22.62	31.24	72.31	847.93
1989	278.75	348.55	341.34	76.87	21.35	4.78	14.13	20.49	53.23	36.34	50.18	116.16	1362.17
1990	169.13	211.48	207.1	46.64	12.95	2.9	8.57	12.43	32.3	22.05	30.45	70.48	826.48
1991	147.9	184.94	181.11	40.79	11.33	2.54	7.5	10.87	28.24	19.28	26.63	61.63	722.76
1992	176.53	220.73	216.16	48.68	13.52	3.03	8.95	12.98	33.71	23.01	31.78	73.56	862.63
1993	207.73	259.75	254.37	57.29	15.91	3.56	10.53	15.27	39.67	27.08	37.4	86.56	1015.11
1994	183.59	229.57	224.82	50.63	14.06	3.15	9.3	13.5	35.06	23.94	33.05	76.51	897.18
1995	169.88	212.43	208.03	46.85	13.01	2.91	8.61	12.49	32.44	22.15	30.58	70.79	830.18
1996	162.99	203.81	199.59	44.95	12.48	2.79	8.26	11.98	31.13	21.25	29.34	67.92	796.49
1997	160.04	200.12	195.97	44.13	12.26	2.74	8.11	11.77	30.56	20.86	28.81	66.69	782.07
1998	200.57	250.79	245.6	55.31	15.36	3.44	10.17	14.75	38.3	26.15	36.11	83.58	980.12
1999	185.28	231.68	226.89	51.1	14.19	3.18	9.39	13.62	35.38	24.16	33.36	77.21	905.43
2000	212.47	265.68	260.18	58.59	16.27	3.64	10.77	15.62	40.58	27.7	38.25	88.54	1038.29
2001	187.63	234.62	229.76	51.74	14.37	3.22	9.51	13.79	35.83	24.46	33.78	78.19	916.92
2002	196.94	246.25	241.15	54.31	15.08	3.38	9.98	14.48	37.61	25.67	35.46	82.06	962.37
2003	152.31	190.45	186.51	42	11.66	2.61	7.72	11.2	29.09	19.86	27.42	63.47	744.3
2004	179.77	224.79	220.13	49.57	13.77	3.08	9.11	13.22	34.33	23.44	32.36	74.91	878.48
2005	158.29	197.93	193.83	43.65	12.12	2.71	8.02	11.64	30.23	20.64	28.5	65.96	773.53

2006	186.41	233.09	228.27	51.41	14.28	3.2	9.45	13.7	35.6	24.3	33.56	77.68	910.94
2007	176.64	220.88	216.3	48.71	13.53	3.03	8.95	12.99	33.73	23.03	31.8	73.61	863.2
2008	179.9	224.96	220.3	49.61	13.78	3.08	9.12	13.23	34.36	23.45	32.39	74.97	879.15
2009	185.05	231.39	226.6	51.03	14.17	3.17	9.38	13.6	35.34	24.13	33.32	77.11	904.3
2010	164.62	205.85	201.58	45.4	12.61	2.82	8.34	12.1	31.44	21.46	29.64	68.6	804.46
2011	211.66	264.67	259.19	58.37	16.21	3.63	10.73	15.56	40.42	27.59	38.11	88.2	1034.34
2012	215.02	268.86	263.29	59.29	16.47	3.69	10.9	15.81	41.06	28.03	38.71	89.6	1050.72
2013	166.84	208.61	204.3	46.01	12.78	2.86	8.46	12.27	31.86	21.75	30.04	69.52	815.28
2014	154.41	193.07	189.08	42.58	11.83	2.65	7.83	11.35	29.49	20.13	27.8	64.34	754.55
MEDIA	167.51	209.34	205.28	48.94	16.66	7.08	12.78	16.45	32.7	26.08	34.04	72	851.87

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

**ANEXO N°3: PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL COMPLETADO Y EXTENDIDO  
ESTACIÓN CORACORA**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1965	70.8	91.94	65.53	15.3	1.04	0.13	1.81	1.45	2.86	4.15	5.55	23.49	284.05
1966	55.74	72.39	51.59	12.04	0.82	0.11	1.42	1.14	2.25	3.27	4.37	18.5	223.65
1967	170.48	221.39	157.78	36.84	2.5	0.32	4.35	3.5	6.88	10	13.37	56.56	683.98
1968	114.01	148.06	105.52	24.64	1.67	0.22	2.91	2.34	4.6	6.69	8.94	37.83	457.43
1969	100.64	130.7	93.15	21.75	1.47	0.19	2.57	2.06	4.06	5.91	7.89	33.39	403.79
1970	106.25	137.98	98.34	22.96	1.56	0.2	2.71	2.18	4.29	6.24	8.33	35.25	426.3
1971	107.72	139.88	99.7	23.28	1.58	0.2	2.75	2.21	4.35	6.32	8.45	35.74	432.18
1972	170.67	221.64	157.96	36.88	2.5	0.32	4.36	3.5	6.89	10.02	13.38	56.63	684.76
1973	131.19	170.37	121.42	28.35	1.92	0.25	3.35	2.69	5.3	7.7	10.29	43.53	526.36
1974	71.8	93.24	66.45	15.51	1.05	0.14	1.83	1.47	2.9	4.21	5.63	23.82	288.07
1975	68.41	88.84	63.31	14.78	1	0.13	1.75	1.4	2.76	4.01	5.36	22.7	274.46
1976	114.57	148.79	106.04	24.76	1.68	0.22	2.93	2.35	4.63	6.72	8.99	38.02	459.69
1977	79.41	103.13	73.5	17.16	1.16	0.15	2.03	1.63	3.21	4.66	6.23	26.35	318.61
1978	50.45	65.51	46.69	10.9	0.74	0.1	1.29	1.03	2.04	2.96	3.96	16.74	202.41
1979	65.97	85.67	61.06	14.25	0.97	0.13	1.68	1.35	2.66	3.87	5.17	21.89	264.67
1980	55.48	72.04	51.34	11.99	0.81	0.11	1.42	1.14	2.24	3.26	4.35	18.41	222.57
1981	97.84	127.05	90.55	21.14	1.43	0.19	2.5	2.01	3.95	5.74	7.67	32.46	392.53
1982	61.04	79.27	56.49	13.19	0.89	0.12	1.56	1.25	2.46	3.58	4.79	20.25	244.89
1983	129.41	168.06	119.77	27.96	1.9	0.25	3.31	2.65	5.22	7.59	10.15	42.94	519.21
1984	10.26	13.32	9.5	2.22	0.15	0.02	0.26	0.21	0.41	0.6	0.8	3.4	41.16
1985	161.47	209.69	149.45	34.89	2.37	0.31	4.12	3.31	6.52	9.48	12.66	53.58	647.85
1986	137.56	178.64	127.32	29.72	2.02	0.26	3.51	2.82	5.55	8.07	10.79	45.64	551.91
1987	75.36	97.87	69.75	16.28	1.1	0.14	1.92	1.55	3.04	4.42	5.91	25	302.36
1988	102.84	133.55	95.18	22.22	1.51	0.2	2.63	2.11	4.15	6.03	8.06	34.12	412.6
1989	235.07	305.26	217.56	50.79	3.44	0.45	6	4.82	9.49	13.79	18.43	77.99	943.12
1990	97.32	126.39	90.08	21.03	1.43	0.18	2.49	2	3.93	5.71	7.63	32.29	390.47
1991	55.7	65	148.2	5.1	0	0	0	0	0	1.5	0.4	1.3	277.2
1992	0	5.1	16.2	0	1.64	0	0	0	4.59	6.61	8.93	37.65	80.72
1993	297.9	6.5	147.3	2	0	0	0	0	0	14.9	11.2	34.6	514.4
1994	187.2	382.7	91	15.4	3	0	0	0	0	0	0	18.2	697.5
1995	129	2.5	106	0	0	0	0	0	4.8	1.4	35.5	28.6	307.8
1996	60.9	171.9	51.5	19	1.64	0	0	5.1	6	6.61	5.4	37.5	365.55
1997	95.7	108.4	64.8	8	0.5	0.21	2.91	39.4	25.9	6.61	8.1	67.7	428.23
1998	262.8	95.7	112.9	7.6	1.64	4.1	2.91	0	4.59	6.61	20.7	103.1	622.65
1999	109.2	341.9	117.1	19.4	0	0	0	0	5.9	33.3	0.9	65.1	692.8
2000	245.1	166.8	141.8	40.9	7.3	0	0	1	0.6	26.6	0.9	37.9	668.9
2001	121	263.6	179.8	74.2	0	0	1.2	0.5	0.6	7.9	1.7	1.3	651.8
2002	57.5	148.1	139.3	74.2	0	0.3	20.8	1.1	3	2.6	29.9	33.2	510
2003	55	144.4	112.7	11.5	9.3	0	0	1.3	0	2.4	0	32.2	368.8
2004	66.3	104.6	104.2	18.2	0	0	17.2	2.7	2.6	0	0	37.65	353.45
2005	43.9	79.1	53.9	15.4	0	0	0	0	23.2	0	0	37.65	253.15



2006	79.1	234.4	145.1	19.1	0	0	0	0.1	6.1	1.5	41.7	11.2	538.3
2007	113.54	147.44	107.9	42.7	3.9	0	0	0	1	2.8	6.6	34.7	460.58
2008	177.1	181.9	107.9	10.1	0	0	0	0	0	0	0	37.65	514.65
2009	80.8	225.1	105.08	32.4	0	0	10	0	0	5.9	9.3	13.9	482.48
2010	57.9	61.5	50.9	23.4	0.9	0	0	0	0	0	8.93	25.2	228.73
2011	138.2	125.7	37	34.4	6.2	0	8.2	0	0	0	6.4	52.9	409
2012	64	181.4	171.1	66.3	0	0	0.8	0	12.2	18.1	0	79.2	593.1
2013	94.44	122.65	87.41	20.41	1.38	0.18	2.41	1.94	3.81	5.54	7.41	31.34	378.92
2014	78.83	102.37	72.96	17.03	1.15	0.15	2.01	1.62	3.18	4.63	6.18	26.15	316.26
MEDIA	106.26	137.99	98.34	22.95	1.55	0.2	2.72	2.18	4.29	6.21	8.35	35.25	426.28

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

**ANEXO N°4: PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL COMPLETADO Y EXTENDIDO  
ESTACIÓN LUCANAS**

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1965	48.03	137.97	159.2	33.89	34.2	17.19	16.27	27.47	16.46	12.17	9.11	16.03	527.99
1966	90.98	96	116.8	60.14	11.87	7.89	7.89	7.89	9.17	42.64	13.7	25.33	490.3
1967	42.28	66.26	80.09	55.13	26.49	7.89	7.89	7.89	7.89	7.89	7.89	39.28	356.85
1968	280.48	29.98	348.94	7.89	7.89	7.89	7.89	7.89	7.89	15.35	13.95	14.19	750.22
1969	24	131	259	144.6	0	0	0	0	20.4	27.5	17	33	656.5
1970	181.2	192.2	391.7	0	0	0	0	0	20.4	27.5	17	3	833
1971	80.7	143.7	149.8	69.6	0	0	0	0	0	0	0	10.5	454.3
1972	15.9	54	109.1	0.8	0.5	0	0	0	1	0.9	0.2	3	185.4
1973	115.3	157.7	151.6	96.7	6.2	4.3	0	0	35.9	0	31.6	39.5	638.8
1974	309.8	177.4	174.4	63.7	0	0	0	22.7	0	0	0	36.8	784.8
1975	152.4	117.6	178.1	9.2	28.4	20.1	2.1	0	0.5	11.5	1	57.6	578.5
1976	244.9	139.8	124.7	3	2	0	2.3	0	50.4	11.4	27.6	35	641.1
1977	21.7	278	181.7	3	2	0	2.3	0	50.4	11.4	27.6	35	613.1
1978	88.4	56.5	81.4	30.3	0	0	0	5.2	2.1	15.6	43.2	17.2	339.9
1979	135.2	49.5	192.1	4.5	1.5	0	3.8	11.4	0	28.1	2.7	22	450.8
1980	135.2	39.3	119.3	0	0	0.1	9.3	3	10.8	42.6	0	30.7	390.3
1981	136.9	185.6	211.3	50.8	0	0	0	15.6	0	15.5	23.8	128	767.5
1982	81.7	160.3	61.6	33	0	0	0	0	19.9	43.9	28.7	13.1	442.2
1983	49.5	48.8	14.6	4.1	0	0	0	0	0	10.2	2	16.8	146
1984	32.9	49.8	138.9	16.8	4	22.9	0	4.4	6.2	28.9	58.1	67.2	430.1
1985	27.7	221.4	289.7	142.5	0	0	0	0	0	0	0	82.3	763.6
1986	134.8	151.7	118.5	21.5	0	0	0	0	0	0	0	80.4	506.9
1987	162.4	23.1	14.3	0	0	0	0	0	0	9.5	4	2	215.3
1988	82.2	231.2	199	36.1	0	0	0	0	0	0	0	59.8	608.3
1989	198.3	144.1	206.4	4.6	4	6	2.6	1.2	0	0	2.4	10.6	580.2
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	50.8	38.5	215	16	0	0	0	0	0	0	17.2	17	354.5
1992	0	46.2	0	0	0	0	0	0	0	18.3	15.9	32.9	113.3
1993	159	154.2	151.5	52.7	8.9	0	0.1	0	0	0	15.6	15.6	557.6
1994	101.2	178.1	95.6	44.4	0	0	0	0	0	0	0	0	419.3
1995	37.1	42.4	210.8	2.5	0	0	0	0	13	9.6	61	61	437.4
1996	162.7	316.9	128.4	181.6	18.7	0	0	21.4	20.2	5	10.3	10.3	875.5
1997	111.1	158.9	66.6	55.7	8.8	0	5	88.8	26.8	10.8	43.1	43.1	618.7
1998	214.7	133.7	101.2	24.3	0	4.7	0	0	1.6	11.2	35.1	35.3	561.8
1999	121.4	269.4	118.7	64.7	7.3	0.1	3.4	0.1	9.1	81.8	2.6	2.6	681.2
2000	223.5	150.8	124.5	16.3	8.1	0.6	0	14.4	13.8	82.2	23.1	23.1	680.4
2001	136	138.4	234	97.3	5.6	0.3	0.5	4.1	19	12.7	2.8	2.8	653.5
2002	191.9	196.4	183.5	34.8	29	2.9	54.1	12.7	1.6	0.2	35.3	35.3	777.7
2003	80.4	135.8	100.5	28.9	15.5	0	3.8	0	0	7.1	0.2	0.2	372.4
2004	58.2	148.1	78.1	47.9	0	1.6	19.5	4.2	3.5	3.2	11	11	386.3
2005	60.4	88.1	66.4	33	0	0	0	6.2	19.5	1.8	3.5	3.5	282.4

2006	149.6	222	121.6	41	0	1.2	0	5.9	5.2	0	55	55	656.5
2007	104.4	143.2	181.3	44.9	6.4	6	0	0	3.6	4.3	17.1	17.1	528.3
2008	296.6	128.2	143.5	28.3	0	1	0	0	0	2.8	0	0	600.4
2009	125.8	275.6	164	38.9	0	0	7	0	1.9	16.4	11	52	692.6
2010	163.4	203	116.4	57	0	0	0	0	3.3	10.2	0	109.1	662.4
2011	204.1	251	77.6	88.2	0	0	21.8	0	3	0	79.2	132.6	857.5
2012	133.43	151.47	162.56	44.09	5.39	1.98	3.44	5.76	8.62	14.51	17	35.17	583.43
2013	122.81	139.41	149.62	40.58	4.96	1.82	3.17	5.3	7.94	13.36	15.65	32.37	536.98
2014	120.07	136.3	146.28	39.67	4.85	1.78	3.1	5.18	7.76	13.06	15.3	31.65	525
MEDIA	120.03	138.58	144.2	40.29	5.05	2.36	3.74	5.77	8.58	13.62	16.37	32.74	531.34

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

**ANEXO N°5: PRECIPITACION TOTAL MENSUAL COMPLETADO Y EXTENDIDO  
ESTACIÓN PUQUIO**

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1965	48.8	129.2	53.2	8.5	0	0	0	0	4	4.4	0	0	248.1
1966	42.9	53.9	47.7	5.5	0	0	0	0	0	26.6	23.2	29.5	186.4
1967	374.4	147.1	59.4	35	0	5.7	0	7.6	0	0	27.4	656.6	
1968	115.6	57.1	120.6	1.8	0	0	0	0	0	34.5	44.7	50.9	425.2
1969	28.6	81.6	146.5	39.3	0	0	0	0	5.2	0	12.8	56.4	370.4
1970	189.8	69.4	67.6	7	10.8	0	0	0	18.6	3.8	1.8	24.6	393.4
1971	62	95.4	152.8	36.4	4.8	0	0	0	0	2.2	1.6	44.2	399.4
1972	156.4	191.6	167	7.6	0	3.8	3.8	0	21.8	24.6	0	80.8	657.4
1973	124.4	104.4	138.8	58.2	0	5.8	0	1.6	35	0	4.6	22.8	495.6
1974	105	64.8	31.6	17.4	0	1.4	0	19.4	5.4	0	4.2	3	252.2
1975	45.8	61.1	77.9	2.8	7.8	0	0	0	2.4	3.6	0	36.9	238.3
1976	160.4	152.8	69.6	4	6.1	0	0	0	12.1	0	0	22.5	427.5
1977	1.4	174.9	68.4	0	0	0	0	0	19.9	0	3.4	15.4	283.4
1978	69.4	28	53.2	14.1	0	0	0	0	0	0	0	0	164.7
1979	19.9	70.7	124.3	0	0	0	0	0	0	13.4	0	0	228.3
1980	45.8	8.1	82.4	0	0	0	7.1	0	20.5	18	0	3.4	185.3
1981	32.5	106.7	78	32.5	0	0	0	17.5	0	0	15.6	76.1	358.9
1982	78.9	54.4	32.2	18.5	0	0	0	0	0	0	24.1	0	208.1
1983	34.2	131.3	205.6	29.8	6.8	0	0	0	7.9	2.9	4.7	65.1	488.3
1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1985	21.6	134.7	318.3	52.6	6.8	0	0	0	0	0.4	0	85.3	619.7
1986	133.1	158.8	145.4	22.8	0	0	0	15.7	0	0	2.8	43.1	521.7
1987	119.4	82.1	22.4	11.4	6.1	3	2.5	4	0.5	3.3	7.4	4.7	266.8
1988	132.5	83.1	51.1	29.8	24.4	0	1	0	6.1	6.8	13.3	31.3	379.4
1989	394.5	252.8	252.8	7.2	4.4	0	0	0	0	9.6	0	0	921.3
1990	33.8	15.4	50.3	3.8	17.2	11	0	0	12	2.4	122	89.7	356.8
1991	72.9	29.8	107.4	21.4	0	0	0	0	0	11.6	4.4	0	247.5
1992	99.7	106.8	95.26	21.2	3.36	0.8	6.2	2.93	5.68	6.69	10.4	35.83	394.9
1993	164.3	82.1	161.4	23.3	20.9	1	0	10.4	0	28.2	14.2	49.8	555.58
1994	144.4	175.6	82	0	3.6	4	0	0	0	2.4	0	19.3	431.3
1995	112.7	15.1	134.3	0	0	0	0	0	17	0	51.3	30.3	360.7
1996	83.1	150.8	31.9	24.2	0	0	0	4.8	1.6	0	3.3	25.5	325.2
1997	73.2	54	62.3	0	0	0	0	41.2	14.3	6.4	5	53.6	310
1998	191.8	115.3	86.8	1.3	0	10	0	0	0	0	33.4	79.8	518.7
1999	64.4	221	89	17.5	1.5	0	0	0	0	16.8	0.6	29.2	440
2000	187.2	129.2	140.9	16.5	7.2	0	0	4	0	12.6	4.6	77.8	580
2001	107	145.6	139.1	43.7	0	0	0	0	0.6	5.7	5.3	5.1	452.1
2002	98.3	142.2	132.5	33.4	3.8	0	14	2.8	5.2	7.6	37.5	22.9	500
2003	46	71.5	80.8	12.5	12.4	0	0	0	0	1.2	0	45.8	270.2
2004	57	89.4	94.9	58.7	0	0	15	6.9	14.3	0	5.2	70.6	411.6
2005	42	74.6	45.7	22.1	0	0	0	1.4	23.9	3.6	0	87.7	301

2006	84.3	187.4	122.5	13.3	0	2.3	0	4.2	0	0	18.5	13.3	445.8
2007	59.1	85.5	159.9	31.5	4.6	0	0	0	5.2	11.2	18.1	20.4	395.5
2008	178.1	115.2	90	3.2	0	0	0	0	0	6.2	0	19.6	412.3
2009	101	166.4	87.1	48.7	0	0	9.5	0	0	7.9	13.3	4.9	438.8
2010	68	73	90.4	19.2	3.6	0	0	0	2.6	7.9	0	68.9	333.6
2011	158.9	119.1	61.6	54.1	12.9	0	93	0	0	0	10.4	66.3	575.84
2012	64	181.4	171.1	66.3	0	0	0.8	0	12.2	18.1	0	79.2	593.1
2013	65.6	136.1	56.2	0	10.6	6	0	1	0	7.8	0	61.7	345
2014	76.4	48.3	82.7	37.9	0	0	0.1	5.5	2.6	16.1	0.5	10.9	281
MEDIA	94.86	109	102.2	20.8	4.29	1	3.2	2.93	5.68	6.69	10.4	35.83	396.91

Nota. Información tomada del Informe Técnico N°048-2018 ANA-AAA.CHCH-ALA.CHA-AT/EWHS. Fuente (ANA, 2018).

## ANEXO N°6: CÓDIGO DE LA UMBRALIZACIÓN DE ESCALA DE GRISES USANDO PDI

```
from PIL import Image, ImageOps, ImageDraw
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import cv2

image_paths = [
    "/content/I5.PNG",
    "/content/I6.PNG",
    "/content/I8.PNG",
    "/content/I9.PNG"
]

images = [Image.open(path) for path in image_paths]

gray_images = [ImageOps.grayscale(img) for img in images]

gray_arrays = [np.array(img) for img in gray_images]

def find_edges(image_array):
    edges = cv2.Canny(image_array, 100, 200)
    return edges

def draw_edges(original_image, edges):
    edge_image = original_image.copy()
    draw = ImageDraw.Draw(edge_image)
    for y in range(edges.shape[0]):
        for x in range(edges.shape[1]):
            if edges[y, x] > 0:
                draw.point((x, y), fill='red')
    return edge_image

edge_images = [find_edges(img) for img in gray_arrays]

highlighted_images = [draw_edges(img, edges) for img, edges in
zip(gray_images, edge_images)]

fig, axes = plt.subplots(len(images), 2, figsize=(10, 15))

for i, (highlighted_img, edge_img) in
enumerate(zip(highlighted_images, edge_images)):
    axes[i, 0].imshow(highlighted_img, cmap='gray')
    axes[i, 0].set_title(f'Imagen con resaltos hidráulicos {i+1}')
    axes[i, 0].axis('off')

    axes[i, 1].imshow(edge_img, cmap='gray')
    axes[i, 1].set_title(f'Imagen de bordes {i+1}')
    axes[i, 1].axis('off')

plt.tight_layout()
plt.show()
```

## ANEXO N°7: CÓDIGO PARA CARACTERIZAR LOS RESALTOS HIDRÁULICOS EN EL CANAL DE RIEGO ALFACCATA

```
from PIL import Image, ImageOps, ImageDraw
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import cv2

image_paths = [
    "/content/I5.PNG",
    "/content/I6.PNG",
    "/content/I8.PNG",
    "/content/I9.PNG"
]

images = [Image.open(path) for path in image_paths]

gray_images = [ImageOps.grayscale(img) for img in images]

gray_arrays = [np.array(img) for img in gray_images]

def find_edges(image_array):
    edges = cv2.Canny(image_array, 100, 200)
    return edges

def draw_rectangles(original_image, edges):
    edge_image = original_image.copy()
    draw = ImageDraw.Draw(edge_image)
    contours, _ = cv2.findContours(edges, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    for contour in contours:
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        draw.rectangle([x, y, x + w, y + h], outline='red')
    return edge_image

edge_images = [find_edges(img) for img in gray_arrays]

highlighted_images = [draw_rectangles(img, edges) for img, edges in
zip(gray_images, edge_images)]

fig, axes = plt.subplots(len(images), 2, figsize=(10, 15))

for i, (highlighted_img, edge_img) in enumerate(zip(highlighted_images,
edge_images)):
    axes[i, 0].imshow(highlighted_img, cmap='gray')
    axes[i, 0].set_title(f'Imagen con resaltos hidráulicos {i+1}')
    axes[i, 0].axis('off')

    axes[i, 1].imshow(edge_img, cmap='gray')
    axes[i, 1].set_title(f'Imagen de bordes {i+1}')
    axes[i, 1].axis('off')

plt.tight_layout()
plt.show()
```

## ANEXO N°8: RUTINA EN PYTHON DE MODELIZACIÓN DE LA AIREACIÓN

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos
S = 0.002 # Pendiente
n = 0.04 # Rugosidad
A = 0.5145 # Área hidráulica en m²
P = 1.96 # Perímetro mojado en m
R = A / P # Radio hidráulico en m
v = 0.457 # Velocidad en m/s
D = 0.49 # Profundidad hidráulica en m

# Precipitación efectiva y Evapotranspiración
precipitacion_efectiva = np.array([83.05, 84.89, 85.48, 29.51, 0, 0, 0,
0, 10.32, 32.9, 34.55, 68.83]) # mm/mes
evapotranspiracion = np.array([137.35, 91.29, 99.25, 99.98, 66.16,
87.47, 92.77, 106.05, 111.65, 128.25, 130.91, 138.09]) # mm/mes

# Balance hídrico (precipitación - evapotranspiración)
balance_hidrico = precipitacion_efectiva - evapotranspiracion

# Número de Froude
g = 9.81 # Gravedad en m/s²
F = v / np.sqrt(g * D)

print(f"Radio Hidráulico (R): {R} m")
print(f"Número de Froude (F): {F}")
print("Balance Hídrico (mm/mes):")
print(balance_hidrico)

meses = np.arange(1, 13, 1)

plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(meses, precipitacion_efectiva, label='Precipitación Efectiva',
marker='o')
plt.plot(meses, evapotranspiracion, label='Evapotranspiración',
marker='s')
plt.plot(meses, balance_hidrico, label='Balance Hídrico', marker='d')
plt.xlabel('Meses')
plt.ylabel('mm')
plt.title('Análisis de Precipitación Efectiva, Evapotranspiración y
Balance Hídrico')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```



## ANEXO N°9: CÓDIGO DEL CÁLCULO DE LA AIREACIÓN

```
import numpy as np
# Constantes empíricas para el cálculo del coeficiente de aireación
k = 0.5
n = 0.75

# Parámetros hidráulicos
v = 0.457 # Velocidad del flujo de agua (m/s)
g = 9.81 # Aceleración debido a la gravedad (m/s²)
D = 0.49 # Profundidad hidráulica (m)

# Cálculo del Número de Froude
F = v / np.sqrt(g * D)

# Cálculo del coeficiente de aireación
alpha = k * (F ** n)

# Resultados
print(f"Número de Froude (F): {F:.2f}")
print(f"Coeficiente de Aireación (α): {alpha:.4f}")

# Balance hídrico (mm/mes)
balance_hidrico = np.array([-42.49, 17.71, 2.95, -79.18, -61.87, -86.47,
-89.57, -103.12, -105.97, -121.56, -120.51, -102.26])

# Interpretación del balance hídrico considerando el coeficiente de
aireación
aireacion_balance_hidrico = balance_hidrico * alpha

print(f"Balance Hídrico Aireado (mm/mes): {aireacion_balance_hidrico}")
```

## ANEXO N°10: CÁLCULO DE VOLUMEN DE AIRE INCORPORADO EN EL AGUA POR SEGUNDO Y EFICIENCIA RELATIVA DEL PROCESO DE AIREACIÓN EN LOS RESALTO

```
import math

def calcular_volumen_aire(Q, Fr, alpha=0.1542, beta=0.02):
    """
    Calcula el volumen de aire incorporado en el agua por segundo con
    un ajuste para evitar valores nulos.

    Parámetros:
    - Q: Caudal de agua en el canal (m³/s)
    - Fr: Número de Froude
    - alpha: Coeficiente de aireación (valor por defecto: 0.1542)
    - beta: Factor de compensación para flujo subcrítico (valor típico:
    0.02)

    Retorna:
    - Volumen de aire incorporado (m³/s)
    """
    Q_a = alpha * Q * (abs(Fr - 1) + beta)
    return Q_a

def calcular_eficiencia_aireacion(Q_a, Q):
    """
    Calcula la eficiencia relativa del proceso de aireación en los
    resaltos hidráulicos.

    Parámetros:
    - Q_a: Volumen de aire incorporado en el agua por segundo (m³/s)
    - Q: Caudal del flujo de agua en el canal (m³/s)

    Retorna:
    - E_a: Eficiencia relativa del proceso de aireación (%)
    """
    if Q == 0:
        return 0 # Evitar división por cero

    E_a = (Q_a / Q) * 100
    return E_a

# Datos
Q = 0.2351 # Caudal del flujo en m³/s
Fr = 0.2084 # Número de Froude
alpha = 0.1542 # Coeficiente de aireación
beta = 0.02 # Ajuste para evitar valores nulos

# Cálculo del volumen de aire incorporado
Q_a = calcular_volumen_aire(Q, Fr, alpha, beta)
print(f"Volumen de aire incorporado: {Q_a:.6f} m³/s")

# Cálculo de la eficiencia de aireación
eficiencia_aireacion = calcular_eficiencia_aireacion(Q_a, Q)
print(f"Eficiencia relativa de aireación: {eficiencia_aireacion:.2f}%")
```

## ANEXO N°11: EVIDENCIA FOTOGRÁFICA

**Figura 39**

*Imagen de la pendiente del canal*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 40**

*Imagen del resalto hidráulico formado en el canal*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 41**

*Imagen de la medición de la velocidad antes del resalto en laboratorio*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 42**

*Imagen de la medición de la velocidad en el resalto en laboratorio*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 43**

*Imagen de la medición de oxígeno antes del resalto*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 44**

*Imagen de la medición de oxígeno después del resalto Hidráulico*



Fuente: Elaboracion propia



**Figura 45**

*Imagen del resalto hidráulico en campo*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 46**

*Imagen de la medición de la velocidad antes del resalto, en campo*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 47**

*Imagen del resalto hidráulico formado en la compuerta en campo*



Fuente: Elaboracion propia

**Figura 48**

*Imagen del canal sin resaltos*



Fuente: Elaboracion propia



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 096-2024-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 762-2024-FIMGC-D**, a los doce días del mes de diciembre de 2024, siendo las 10:00 a.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS y los miembros; MSc. Ing. Edward LEON PALACIOS, MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO y MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ actuando como secretario docente el MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

**Juan Carlos GARCIA GUTIERREZ**

Quien presentó la tesis denominada:

**Análisis computacional y numérico de la aireación de resaltos hidráulicos en el canal de riego Alfaccata, distrito de Puquio, Ayacucho**

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

**APROBADO CON NOTA QUINCE (15)**

Siendo las 11:50 a.m. del día 12 de diciembre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS  
Presidente

MSc. Ing. Edward LEON PALACIOS  
Miembro

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO  
Miembro

MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ  
Miembro

  
MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO  
Secretario docente de la FIMGC

cc:  
Archivo





UNSCH

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana "

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 003-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

**Apellidos y Nombres** : Juan Carlos GARCIA GUTIERREZ  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA CIVIL  
**Título de la Tesis** : Análisis computacional y numérico de la aireación de resaltos hidráulicos en el canal de riego Alfaccata, distrito de Puquio, Ayacucho  
**Evaluación de la Originalidad** : 12 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2618227333

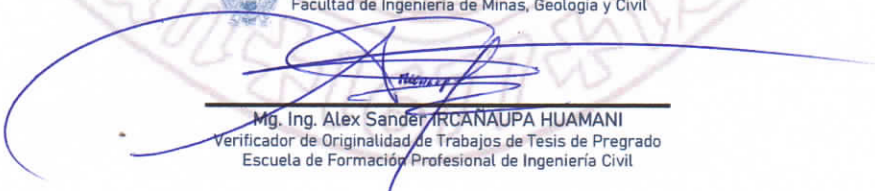
Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 18 de marzo de 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

  
Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANI  
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado  
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Con depósito para Sustentación y Trámites  
Cc. Archivo.

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL  
Av. Independencia S/N Ciudad Universitaria  
Central Tel. 066 312510  
Anexo 151

# Análisis computacional y numérico de la aireación de resaltos hidráulicos en el canal de riego Alfaccata, distrito de Puquio, Ayacucho

*por* Juan Carlos GARCIA GUTIERREZ

---

**Fecha de entrega:** 18-mar-2025 10:02a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2618227333

**Nombre del archivo:** TE\_Juan\_Carlos\_Garcia\_Gutierrez.pdf (3.57M)

**Total de palabras:** 28388

**Total de caracteres:** 141581

# Análisis computacional y numérico de la aireación de resaltos hidráulicos en el canal de riego Alfaccata, distrito de Puquio, Ayacucho

## INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	2%
	Trabajo del estudiante	
2	<a href="http://bibdigital.epn.edu.ec">bibdigital.epn.edu.ec</a>	2%
	Fuente de Internet	
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a>	1%
	Fuente de Internet	
4	<a href="http://uvadoc.uva.es">uvadoc.uva.es</a>	1%
	Fuente de Internet	
5	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a>	1%
	Fuente de Internet	
6	<a href="http://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a>	1%
	Fuente de Internet	
7	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a>	<1%
	Fuente de Internet	
8	<a href="http://www.repositorio.usac.edu.gt">www.repositorio.usac.edu.gt</a>	<1%
	Fuente de Internet	

9	ASESORES TECNICOS ASOCIADOS S.A.. "EIA-D del Proyecto Construcción del Sistema Integral de Irrigación Caracha-IGA0012159", R.D.G. N° 139-13-MINAGRI-DGAAA, 2020 Publicación	<1 %
10	ns2.une.edu.py:7004 Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	VILLALBA CENTENO CARMEN YANETH. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto Mejoramiento del Servicio de Agua para Riego del Canal Chiuzani Baja del Tramo Toma-Chaucco del Caserío de Toma, Distrito de Chaviña-Lucanas-Ayacucho-IGA0012237", R.D.G. N° 213-2017-MINAGRI-DVDIAR DGAAA, 2020 Publicación	<1 %
15	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
16	docta.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
17	idoc.tips Fuente de Internet	<1 %

---

18	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://www.iwmi.cgiar.org">www.iwmi.cgiar.org</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
22	<a href="http://repositorio.upla.edu.pe">repositorio.upla.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
23	Submitted to Universidad Fasta Trabajo del estudiante	<1 %
24	Submitted to Universidad Nacional Hermilio Valdizan Trabajo del estudiante	<1 %
25	<a href="http://repositorio.upct.es">repositorio.upct.es</a> Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad Privada Antenor Orrego Trabajo del estudiante	<1 %
27	<a href="http://repositorio.upao.edu.pe">repositorio.upao.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad de Valladolid Trabajo del estudiante	<1 %

---

30

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

31

Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR)

Trabajo del estudiante

<1 %

32

Submitted to Universidad San Francisco de Quito

Trabajo del estudiante

<1 %

33

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo