UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Mejoramiento de la infraestructura de riego para incrementar la eficiencia de riego y aprovechamiento hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025

Asesor:

Msc. Maldonado Mendívil, Ángel

Autor:

Amaro Taipe, Yoel

Para optar el Título Profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac - Perú

2025

Acta de sustentación

Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL Acta N°: 059

En la ciudad de Abancay, a los veinte cinco **días** del mes de **agosto del 2025**, siendo las **9:00 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral **N° 0707-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **19** de **agosto** del **2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. Saavedra Ore, Danilo
Dictaminante	:	Ing. Cayo Baca, Holguer
Replicante	:	Mag. Loayza Elguera, Rodrigo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Mejoramiento de la infraestructura de riego para incrementar la eficiencia de riego y aprovechamiento hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay - 2025

Desarrollado por las (los) Bachilleres (es):

Br: Amaro Taipe, Yoel

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad

(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Amaro Taipe, Yoel	**Aprobado**

Siendo **las 10:00am horas** concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Saavedra Ore, Danilo (.....)

Dictaminante: Ing. Cayo Baca, Holguer (.....)

Replicante: Mag. Loayza Elguera, Rodrigo (.....)

Abancay 28 de agosto del 2025

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 354

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*): **Mayoría**: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad**: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art.18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

13% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
15% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

turnitin Página 2 de 164 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:543640510

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Amaro Taipe, Yoel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	47792722
URL ORCID	:	
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Msc. Maldonado Mendívil, Ángel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2025
Fuente de financiamiento	:	Propia
Porcentaje de similitud	:	19%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía constante y fuente inagotable de fortaleza a lo largo de este camino llamado vida.

A mis padres, Dora Taipe y Eusebio Amaro, por su apoyo inquebrantable y por ser el pilar fundamental en cada paso que doy.

A mis hermanos, Lenin, Kevin y Yuri por su aliento, por creer en mi incluso cuando yo dudaba, y por impulsarme siempre a seguir adelante y luchar por mis sueños.

Agradecimiento

A mis padres, el señor Eusebio Amaro y la señora Dora Taipe, expreso mi más profundo agradecimiento por el constante apoyo, los valores inculcados y el ejemplo de responsabilidad, esfuerzo y dedicación que han guiado mi formación personal y profesional. Su respaldo incondicional ha sido esencial para alcanzar este logro.

Además, deseo extender mi gratitud a mis hermanos por su constante apoyo, por estar presentes en cada etapa de este recorrido y por brindarme siempre palabras de ánimo. Su cercanía, afecto y confianza en mi han sido un estimulo invaluable en mi formación académica y personal.

Resumen

En la región altoandina de Atumpata, Abancay, el canal Huallhuayoc presenta pérdidas significativas de agua por filtración debido a tramos sin revestir y la ausencia de estructuras de control, generando desigualdad en la distribución y baja eficiencia del riego. El objetivo principal fue evaluar el efecto del mejoramiento de la infraestructura en la eficiencia hidráulica y el aprovechamiento hídrico. Se aplicó una metodología de tipo aplicada, nivel descriptivo, enfoque cuantitativo y diseño no experimental-transversal. Se realizaron aforos con vertederos calibrados, levantamiento topográfico con GPS diferencial, análisis hidrometeorológico mediante la fórmula de Penman y entrevistas semiestructuradas a 18 usuarios. Los resultados mostraron que, en el tramo revestido (0+000 a 0+800), las pérdidas por infiltración se redujeron a 1.47 L/s, frente a 3.85 L/s en el tramo no revestido, logrando una mejora del 61.8 %. La eficiencia hidráulica aumentó de 86.86 % a 96.35 %. Además, el Índice de Equidad de Distribución subió de 43.0 % a 66.5 % y el Índice de Regulación Hidráulica mejoró de 0 % a 75 % tras incorporar estructuras de control. Se concluye que el revestimiento del canal y el reforzamiento de la infraestructura incrementan notablemente la eficiencia y el aprovechamiento del recurso hídrico, recomendando su aplicación en otros sectores similares y un plan de mantenimiento participativo. La tesis comprende seis capítulos que abordan desde el planteamiento hasta las recomendaciones finales.

***Palabras Clave**:* canal Huallhuayoc, eficiencia hidráulica, pérdidas hídricas, revestimiento de canal.

Abstract

In the high Andean region of Atumpata, Abancay, the Huallhuayoc Canal presents significant water losses due to infiltration due to unlined sections and the absence of control structures, generating uneven distribution and low irrigation efficiency. The main objective was to evaluate the effect of infrastructure improvements on hydraulic efficiency and water use. An applied methodology was applied, descriptive level, quantitative approach, and non-experimental-cross-sectional design. Gauging was carried out with calibrated weirs, topographic surveys with differential GPS, hydrometeorological analysis using the Penman formula, and semi-structured interviews with 18 users. The results showed that, in the lined section (0+000 to 0+800), infiltration losses were reduced to 1.47 L/s, compared to 3.85 L/s in the unlined section, achieving a 61.8% improvement. Hydraulic efficiency increased from 86.86% to 96.35%. Furthermore, the Distribution Equity Index increased from 43.0% to 66.5%, and the Hydraulic Regulation Index improved from 0% to 75% after incorporating control structures. It is concluded that canal lining and infrastructure reinforcement significantly increase efficiency and water resource utilization, recommending their application in other similar sectors and a participatory maintenance plan. The thesis comprises six chapters that cover everything from the proposal to the final recommendations.

Keywords: Huallhuayoc Canal, hydraulic efficiency, water losses, canal lining.

Índice general

Portada..... **i**

Acta de sustentación..... **ii**

Reporte de similitud..... **iii**

Metadatos..... **iv**

Dedicatoria..... **v**

Agradecimiento..... **vi**

Resumen..... **vii**

Abstract..... **viii**

Índice general..... **ix**

Índice de Tablas..... **xi**

Índice de Figuras..... **xiii**

Índice de Anexos..... **xv**

I. INTRODUCCION..... **16**

1.1 Introducción..... 16

1.2 Planteamiento del problema..... 17

1.3. Justificación e importancia..... 19

1.4. Objetivos..... 21

1.4.1. Objetivo General..... 21

1.4.2. Objetivos Específicos..... 21

1.5. Hipótesis..... 22

1.6. Variables..... 23

II. Revisión de Literatura 25

2.1. Antecedentes 25

2.2. Bases teóricas 30

2.3. Definición de términos 33

III. Metodología 40

3.1. Tipo y nivel de investigación 40

3.1.1 Tipo de investigación 40

3.1.2 Nivel de investigación 40

3.1.3 Diseño de investigación 40

3.1.4 Enfoque de investigación 41

3.2. Ámbito temporal y espacial 42

3.3. Población y muestra 43

3.4. Instrumentos 44

3.5. Procedimientos 45

3.6. Análisis de datos 46

3.7. Consideraciones éticas 46

IV. Resultados 48

V. Discusión 109

VI. Conclusiones 111

VII. Recomendaciones 117

VIII. Referencias 118

IX. Anexos ..... ¡Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

Tabla 1 *Operacionalización de las variables*.....*24*

Tabla 2 *Estación meteorológica* *49*

Tabla 3 *Registro de temperatura °C* 49

Tabla 4 *Registro de Precipitación (mm/día) y humedad (%)* 50

Tabla 5 *Resultados del caudal aforado en el canal revestido* 63

Tabla 6 *Resultados del caudal aforado en el canal de tierra*.....68

Tabla 7 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de enero del 2025* 73

Tabla 8 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de febrero del 2025* 75

Tabla 9 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de marzo del 2025*.....76

Tabla 10 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de abril del 2025*.....78

Tabla 11*Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de mayo del 2025*.....80

Tabla 12 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de junio del 2024* 81

Tabla 13 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de julio del 2024* 83

Tabla 14 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de agosto del 2024****.....***85

Tabla 15 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de setiembre del 2024* 87

Tabla 16 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de octubre del 2024****.....***89

Tabla 17 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de noviembre del 2024****.....***91

Tabla 18 *Cálculo de la evaporación correspondiente al mes de diciembre del 2024* 92

Tabla 19 *Perdida de caudales en canal revestido* 96

Tabla 20 *Perdida de caudales en canal de tierra*.....97

Tabla 21 *Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra*.....98

Tabla 22 *Comparación de pérdidas de caudal en ambos canales*.....100

Tabla 23 *Aforo diario y eficiencia hidráulica de los tramos de canal revestido y de tierra* 102

Tabla 24 *Resumen comparativo de eficiencia hidráulica entre canal revestido y de tierra* 103

Tabla 25 *Indicadores hidráulicos comparativos entre tramos con y sin estructuras de control* 106

Índice de Figuras

Figura 1 *Levantamiento topográfico con GPS Diferencial* *51*

Figura 2 *Situación actual de la bocatoma*..... *53*

Figura 3 *Situación actual del canal revestido* *53*

Figura 4 *Sección del canal de concreto*..... *54*

Figura 5 *Sección del vertedero en canal revestido*..... *57*

Figura 6 *Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 0+200)* *58*

Figura 7 *Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 0+200)* 58

Figura 8 *Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 0+200)* 59

Figura 9 *Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 0+200)* 59

Figura 10 *Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 0+200)* 60

Figura 11 *Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 0+420)*..... 60

Figura 12 *Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 0+420)* 61

Figura 13 *Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 0+420)* 61

Figura 14 *Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 0+420)* 62

Figura 15 *Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 0+420)* 62

Figura 16 *Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 1+000)* 63

Figura 17 *Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 1+000)* 64

Figura 18 *Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 1+000)* 64

Figura 19 *Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 1+000)* 65

Figura 20 *Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 1+000)* 65

Figura 21 *Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 1+200)* 66

Figura 22 *Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 1+200)* 66

Figura 23 *Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 1+200)* *67*

Figura 24 *Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 1+200)* *67*

Figura 25 *Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 1+200)* *68*

Figura 26 *Evaporación vs Temperatura*..... *95*

Figura 27 *Aforo en los tramos revestido y de tierra* *98*

Figura 28 *Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra* *99*

Figura 29 *Perdidas por infiltracion en ambos tipos de canales*..... *100*

Figura 30 *Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra* *104*

Figura 31 *Distribución porcentual del caudal entre usuarios de cabecera y cola*..... *107*

Figura 32 *Pérdidas de agua por infiltración según tipo de canal* *113*

Figura 33 *Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos del canal* *114*

Figura 34 *Equidad en la distribución del agua entre tramos del canal*..... *116*

Índice de Anexos

Anexo 01 *Matriz de Consistencia*.....***¡Error! Marcador no definido.***

Anexo 02 *Matriz de Operacionalización de variables*.....***¡Error! Marcador no definido.***

Anexo 03 *Levantamiento topografico*.....***¡Error! Marcador no definido.***

Anexo 04 *Planos topográficos*.....***¡Error! Marcador no definido.***

I. INTRODUCCION

1.1 Introducción

La gestión y mantenimiento adecuado de la infraestructura de riego es fundamental para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico y evitar costos elevados por pérdidas y disminución de la productividad agrícola. En el Perú, se estima que aproximadamente el 45 % del agua destinada al riego se pierde debido al mal estado de canales y estructuras asociadas, lo que evidencia deficiencias críticas en el sistema de conducción y distribución (Ybánez, 2023). Estas pérdidas no solo implican un uso ineficiente de un bien escaso, sino que también incrementan los costos operativos de los agricultores y reducen el rendimiento de los cultivos, afectando la seguridad alimentaria y los ingresos en zonas rurales.

En la región Apurímac, donde la precipitación media anual en la provincia de Abancay ronda los 1 290 mm con marcada estacionalidad de lluvias y sequías (Climate-Data.org, s.f.; SENAMHI, s.f.), más de 693 comités de usuarios se benefician de infraestructura de riego que requiere intervenciones periódicas para mantener su operatividad (Autoridad Nacional del Agua, 2023). No obstante, la falta de diagnósticos integrales y la limitada precisión en la medición y control de caudales agravan la inequidad en la distribución y originan conflictos entre regantes, al tiempo que aumentan la vulnerabilidad frente a eventuales variaciones climáticas y estacionales. Esto resalta la necesidad de abordar de manera sistemática la evaluación y mejora de canales como el Huallhuayoc, en Atumpata, donde las condiciones propias del entorno altoandino y la organización comunitaria exigen soluciones técnicas y de gestión adaptadas.

Para determinar si el canal Huallhuayoc requiere intervenciones específicas, se emplearán métodos de medición de caudal en campo (aforos con vertederos calibrados), levantamientos topográficos para caracterizar pendientes y secciones, análisis hidrometeorológico para estimar pérdidas por evaporación e infiltración, y recolección de percepciones de usuarios mediante entrevistas semiestructuradas. Este conjunto de métodos permitirá diagnosticar el estado actual de la infraestructura, cuantificar las

pérdidas de agua en tramos críticos y comprender la dinámica de gestión comunitaria, sentando las bases para propuestas de revestimiento, incorporación de estructuras de control y sistemas de monitoreo que aumenten la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, s.f.).

El objetivo principal de este estudio es conocer detalladamente la condición actual del canal Huallhuayoc en Atumpata en términos de conducción y distribución del agua y proponer mejoras en la infraestructura y en los mecanismos de gestión para incrementar la eficiencia de riego y maximizar el aprovechamiento del recurso hídrico en la campaña 2025. Para ello, se plantean objetivos específicos que abarcan el diagnóstico cuantitativo de pérdidas de caudal, la caracterización de la infraestructura existente y su comportamiento hidráulico, y el análisis de percepciones y prácticas de los usuarios, de modo que las intervenciones recomendadas sean técnica y socialmente pertinentes.

Estructura de la tesis: Capítulo I: Introducción y justificación, Capítulo II: Antecedentes y marco teórico, Capítulo III: Metodología, Capítulo IV: Resultados y discusión, Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.

1.2 Planteamiento del problema

En Ecuador, las redes de riego tradicionales presentan un entramado de deficiencias técnicas y organizativas que dificultan su diagnóstico y mejora: estructuras rústicas y dispersas que no cumplen criterios modernos de hermeticidad y control generan pérdidas por infiltración y erosión; la compleja movilización y distribución del agua entre usuarios carece de mecanismos precisos de medición y regulación, lo que origina inequidades y conflictos; además, la ausencia de inventarios y diagnósticos integrales que consideren la evolución histórica de cada sistema, las dinámicas sociales locales y las condiciones hidrometeorológicas impide planificar intervenciones coordinadas de rehabilitación y mantenimiento; todo ello evidencia la vulnerabilidad de estas redes frente a variaciones climáticas y la falta de voluntad institucional para abordarlas de forma coherente, destacando la necesidad de metodologías de evaluación y estrategias de

fortalecimiento comunitario que guíen la modernización adecuada de la infraestructura de riego (Institut de Recherche pour le Développement, s.f., p. 1).

En el Perú, a pesar de contar con abundantes recursos hídricos, la infraestructura de riego presenta deficiencias críticas que provocan la pérdida de casi la mitad del agua canalizada: canales deteriorados por deslizamientos y antigüedad generan infiltraciones y obstrucciones que reducen drásticamente la eficiencia del 80 % del recurso que emplea el sector agrario, mientras la falta de mantenimiento oportuno, mecanismos precisos de medición y control, así como marcos normativos y capacidad operativa insuficientes, acentúan la vulnerabilidad de los agricultores frente a sequías, bloqueos o variaciones climáticas, elevando conflictos por distribución y afectando la productividad y seguridad alimentaria nacional (Ybánez, 2023).

En la región Apurímac, donde la precipitación media anual en Abancay se aproxima a 1 290 mm con marcada estacionalidad (Climate-Data.org, s.f.), la infraestructura de riego presenta deficiencias críticas: canales deteriorados provocan pérdidas cercanas al 45 % del recurso conducido (Ybánez, 2023), mientras la ausencia de mantenimiento sistemático, mecanismos precisos de medición y control del caudal incrementa las inequidades en la distribución y genera conflictos sociales por el agua (Ministerio del Ambiente, 2010). Estas fallas agravan la vulnerabilidad de los agricultores frente a la variabilidad climática, limitan la disponibilidad efectiva de agua para riego y reducen la productividad de los cultivos en localidades altoandinas como Atumpata, evidenciando la urgencia de intervenir el canal Huallhuayoc mediante revestimientos adecuados, estructuras de control y sistemas de monitoreo que permitan optimizar la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico de forma sostenible.

1.2.1. Problema general

¿En qué medida el mejoramiento de la infraestructura de riego influye en la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025?

1.2.2. Problemas Específicos

a. ¿Cómo afecta el revestimiento y la rehabilitación de los canales de riego a la reducción de pérdidas hídricas por infiltración y evaporación en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025?

b. ¿En qué grado difiere la eficiencia hidráulica en la conducción del agua entre tramos de canal revestido y no revestido, considerando las variaciones de caudal en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025?

c. ¿Qué tanto contribuyen las estructuras de control (compuertas y medidores de caudal) a la mejora de la distribución equitativa y al uso racional del recurso hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025?

1.3. Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

1.3.1.1. Justificación práctica

La mejora de la infraestructura de riego en el canal Huallhuayoc se fundamenta en la necesidad de optimizar el uso del agua disponible en Atumpata, donde las pérdidas por filtración y evaporación reducen sustancialmente el volumen efectivo que llega a los cultivos. Al revestir y rehabilitar los tramos más vulnerables, se espera disminuir el derrame y las filtraciones al subsuelo, con lo cual el caudal conducido se aprovecha de manera más eficiente. Además, la incorporación o adaptación de compuertas y medidores de caudal reforzará el control operativo, permitiendo regular volúmenes con mayor precisión y responder con agilidad a variaciones de demanda o condiciones climáticas. En este sentido, las intervenciones proyectadas no solo buscan la mejora física de las estructuras, sino optimizar el desempeño del sistema de distribución, traduciendo en un uso más rentable y sostenible del recurso hídrico.

1.3.1.2. Justificación social

Desde la perspectiva de la comunidad agrícola de Atumpata, cualquier avance en las obras de riego impacta directamente en los medios de vida: menores pérdidas implican más agua disponible para riegos oportunos y uniformes, lo cual se traduce en mejores

rendimientos, seguridad alimentaria y estabilidad económica de los pequeños agricultores. Al reforzar la equidad en la entrega del recurso mediante estructuras de control adecuadas, se reduce la competencia entre usuarios y potenciales conflictos por agua, promoviendo la cohesión social y fortaleciendo la gobernanza local del sistema de riego. Asimismo, al mejorar la confiabilidad del suministro, se favorece la planificación de cultivos y se brinda mayor resiliencia frente a variaciones climáticas, contribuyendo al bienestar colectivo y al desarrollo rural sostenible de la localidad.

1.3.1.3. Justificación teórica

Aunque existen estudios generales sobre revestimiento de canales y eficiencia hidráulica en regiones andinas, el contexto específico de Atumpata y el canal Huallhuayoc presenta características particulares (altitud, topografía, clima, organización de usuarios) que no siempre se han examinado de manera integrada. Esta tesis aporta al cuerpo de conocimiento al proporcionar evidencia sobre el efecto de intervenciones en tramos concretos y bajo condiciones reales de operación, combinando mediciones de campo y percepciones de los regantes. Así, se amplía la comprensión de cómo las mejoras estructurales influyen en la eficiencia de conducción y en el aprovechamiento hídrico en ambientes altoandinos, contribuyendo a llenar un vacío en la literatura local y regional que suele centrarse en contextos más generales o en modelos teóricos sin validación empírica específica.

1.3.1.4. Justificación metodológica

La estrategia de investigación adopta un enfoque mixto que integra mediciones hidráulicas de caudales y pérdidas con levantamientos topográficos y análisis hidrometeorológico, junto con entrevistas semiestructuradas a usuarios. Esta combinación metodológica resulta relevante porque permite abordar el problema de forma holística: desde la cuantificación de pérdidas en los distintos tramos del canal hasta la comprensión de la percepción y prácticas de gestión por parte de la comunidad. El diseño comparativo-transversal, con selección de puntos de aforo técnicamente equivalentes en pendientes, sumado al análisis de estructuras de control, ofrece un marco replicable para estudios

similares. De este modo, la tesis no solo genera resultados prácticos, sino que propone un procedimiento de evaluación de mejoras de infraestructura aplicable en otras localidades con características análogas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar el mejoramiento de la infraestructura de riego para incrementar la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico en la localidad de Atumpata - Abancay - 2025.

1.4.2. Objetivos Específicos

a. Analizar el impacto del revestimiento y la rehabilitación de los canales de riego en la reducción de pérdidas hídricas por infiltración y evaporación en la localidad de Atumpata - Abancay - 2025.

b. Comparar la eficiencia hidráulica en la conducción del agua entre tramos de canal revestido y no revestido, considerando las pérdidas por variación de caudal en la localidad de Atumpata - Abancay - 2025.

c. Evaluar la efectividad de las estructuras de control (compuertas y medidores de caudal) en la mejora de la distribución equitativa y el uso racional del recurso hídrico en la localidad de Atumpata - Abancay - 2025.

Importancia

La investigación reviste relevancia estratégica tanto a nivel local como regional, al abordar directamente un problema recurrente de las zonas altoandinas: la escasez de agua útil debido a pérdidas in situ y falta de control preciso. Al demostrar cuantitativamente que el revestimiento y la rehabilitación de canales, junto con la implementación o mejora de compuertas y medidores, pueden aumentar la eficiencia de conducción y el volumen de agua aprovechable, la tesis aporta una base técnica sólida para que las autoridades locales y los comités de riego prioricen inversiones y tareas de mantenimiento. De este modo, se

favorece la asignación más eficiente de recursos (financieros, humanos y materiales), maximizando el impacto de las intervenciones en la productividad agrícola y en la resiliencia frente a sequías o variaciones climáticas.

Asimismo, el estudio tiene una importancia social y económica: al optimizar el sistema de riego, se mejora la estabilidad de la producción agrícola local, sustento principal de muchas familias en Atumpata, reduciendo vulnerabilidades asociadas a la inseguridad hídrica. Esto no solo eleva la calidad de vida de los agricultores y sus familias, sino que también genera efectos multiplicadores en la economía rural (mayor cosecha disponible, mayor ingreso, posible diversificación de cultivos). Además, al incorporar la voz y experiencia de los usuarios mediante entrevistas, se refuerza la apropiación comunitaria de las soluciones y se fomenta la gobernanza participativa en la gestión del agua.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El mejoramiento de la infraestructura de riego incrementa significativamente la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025.

1.5.2. Hipótesis Específicas

a. El revestimiento y la rehabilitación de los canales de riego reducen significativamente las pérdidas hídricas por infiltración y evaporación en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025.

b. La eficiencia hidráulica de conducción es significativamente mayor en los tramos de canal revestido que en los no revestidos en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025.

c. Las estructuras de control (compuertas y medidores de caudal) mejoran significativamente la distribución equitativa y el uso racional del recurso hídrico en la localidad de Atumpata – canal Huallhuayoc – Abancay – 2025.

1.6. Variables

Variable dependiente

VD: Eficiencia de riego

VD: Aprovechamiento hídrico

Variable independiente

VI: Mejoramiento de la infraestructura de riego

A continuación, se presenta la tabla 1 de la operacionalización de variables:

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de Medición	Instrumento
Variable D 1: Eficiencia de riego	Porcentaje del volumen de agua aplicado que es efectivamente conducido y distribuido hasta las zonas de cultivo sin pérdidas significativas (FAO, 2003).	Cálculo de la proporción entre caudal útil entregado a parcelas (L/s) y caudal total suministrado al canal (L/s), recogido antes y después de la obra de mejoramiento.	•Eficiencia de conducción •Eficiencia de distribución	•(Caudal de salida/Caudal de entrada) × 100 •(Volumen entregado/Volumen suministrado) × 100	Razón Razón	•Aforos con vertedero •Registros de caudales diarios
Variable D 2: Aprovechamiento hídrico	Relación entre el volumen de agua consumido por el cultivo y el volumen total de agua descargada en el sistema, indicador de cuán eficientemente el agua contribuye a la producción (Molden et al., 2007).	Cálculo de la proporción entre volumen de agua infiltrado en el suelo efectivo para el cultivo (m^3) y volumen total descargado en el canal (m^3), registrado durante la campaña de riego 2025.	•Eficiencia de aplicación •Productividad del agua	•(Volumen infiltrado/Volumen descargado) × 100 •Rendimiento agrícola (kg de cultivo/m^3 de agua aplicada)	Razón Razón	•Medición volumétrica •cosecha
Variable I: Mejoramiento de la infraestructura de riego	Conjunto de intervenciones técnicas dirigidas a reducir pérdidas por infiltración y evaporación, mejorar la conducción y el control del flujo en canales de riego para optimizar el uso del agua (FAO, 2017).	Aplicación de revestimiento en tramos de canal (m), rehabilitación de compuertas (n.º de unidades) y montaje de medidores de caudal (n.º de unidades) en el canal Huallhuayoc.	•Revestimiento del canal •Estructuras de control	•Longitud de canal revestido (m) •Número de compuertas rehabilitadas •Número de medidores instalados	Razón Razón Razón	•Registro de obras y actas de recepción •Inspección de campo

Nota. En la Tabla 1 se presenta la operacionalización de las variables según el título y los objetivos de la investigación. Fuente: El autor.

II. Revisión de Literatura

2.1. Antecedentes

2.1.1 A nivel internacional

En Uzbekistán, Zeleňáková et al. (2025), en el artículo *The Effect of Lining Hydraulic Properties on the Efficiency and Cost of Rehabilitation of the Tashkent Magistral Canal*, cuyo objetivo fue evaluar el impacto de distintos materiales de revestimiento en la eficiencia y el costo de rehabilitación; la metodología combinó mediciones de campo (caudal y batimetría con perfilador Doppler) en un tramo de 1 km con modelamiento en HEC-RAS; resultando coeficientes de correlación $R^2 = 0,86$ entre caudales medidos y modelados, y costos de revestimiento que oscilaron entre USD 49,89/m (piedra) y USD 163,86/m (concreto), con mejoras de eficiencia hidráulica de 21,7 %–34,4 % según el material; concluyen que los revestimientos de geomembrana y piedra ofrecen la mejor relación costo-beneficio para reducir pérdidas por infiltración.

En Uganda, Wanyama y Bwambale (2023), en el artículo *Hydraulic modelling of irrigation canals for improved flow conditions in surface irrigation systems*, donde su objetivo fue mejorar las condiciones de flujo en el Doho Rice Irrigation Scheme; la metodología aplicó modelamiento hidráulico con HEC-RAS, comparando condiciones “actuales” vs. “mejoradas” (desazolve, limpieza, revestimiento plástico y de concreto) en canales de tierra; resultando incrementos en la eficiencia de flujo de 20 % (desazolve), 37 % (concreto) y 48 % (revestimiento plástico), y velocidades de flujo óptimas de 0,8–1,2 m/s; concluyen que el modelado HEC-RAS es esencial para planificar intervenciones que aumenten la eficiencia y distribución del agua.

En India, Sharief y Zakwan (2021), en el estudio *Comparative analysis of seepage loss through different canal linings,* centrada en comparar el desempeño de revestimientos con polietileno de baja densidad (LDPE) y mampostería de cascajo (RR); la metodología fue experimental de inflow-outflow en un canal trapezoidal de 55 m de longitud, midiendo

caudales y pérdidas en canales sin revestir, RR y LDPE; resultando pérdidas de 19 % (sin revestir), 8 % (RR) y 2 % (LDPE) y costos de revestimiento de ₹ 128,20/m (RR) vs. ₹ 37,29/m (LDPE); concluyen que el revestimiento LDPE es tres veces más económico y reduce significativamente las pérdidas, aunque requiere reemplazo cada dos años.

En Ecuador, Ortiz et al. (2021), en su estudio *Efficiencies in the Tumbaco irrigation system,* Ecuador, orientada a determinar las eficiencias de conducción, distribución, aplicación, sistema y global del sistema de riego Tumbaco; la metodología es de tipo aplicada y descriptiva, con mediciones de caudal en el canal principal (1 550 l/s) y en secundarios (Alangasí, Ilaló, Churoloma, El Pueblo, San Blas, La Viña, Chichipata), aforos en unidades terciarias, cálculo de eficiencia de conducción mediante fórmulas de Parshall y vertedero de cresta delgada, de distribución según el coeficiente de Christiansen, de aplicación con el método de Bos y Nugteren, y de eficiencias compuestas según Bos y Nugteren e Irmak et al.; resultando que la eficiencia de conducción es 78,82 % (regular), la de distribución 37,95 % (pobre), la de aplicación 60,72 % (buena), la eficiencia del sistema 47,86 % (regular) y la global 18,17 % (pobre), con 61,1 % del área sobre-irrigada, 29,4 % sub-irrigada y solo 9,5 % con riego adecuado; concluyen que la baja eficiencia de distribución, derivada de tiempos de riego y estructuras de control inadecuados, es el factor crítico que reduce la eficiencia global, recomendando modernizar compuertas, ajustar turnos de riego y fortalecer el mantenimiento de la red de canales.

En Ecuador, Yepez et al. (2025), en su artículo *“Diseño hidráulico de redes principales y parcelarias del sistema de riego por aspersión en el sector Chaupiloma II – Píllaro”*, que tiene como objetivo dimensionar la red principal y parcelaria de un sistema de riego por aspersión para la comunidad de Chaupiloma II; la metodología es de tipo aplicada y descriptiva, con levantamiento topográfico, datos climatológicos de la estación de Pisayambo, evaluación de cultivos, uso de IRRICAD V15 para diseño hidráulico y AutoCAD Civil 3D para el trazado de redes; resultando un caudal total de 25,78 L/s distribuido en tres

ramales de 7,65 L/s, 9,46 L/s y 8,67 L/s, con diámetros de tubería y número de aspersores calculados para garantizar uniformidad y cobertura, así como diseño de desarenadores y accesorios; concluyen que el sistema diseñado satisface la demanda hídrica de la zona, optimiza el uso del agua y facilita el mantenimiento periódico de la red (Yepez-Intriago et al., 2025).

2.1.2 A nivel nacional

Según Capcha Ricaldi y Martínez Chuquillanqui (2021), en su tesis *Evaluación de eficiencia hidráulica de canales de riego por gravedad – canal Huayao, Chupaca, Junín 2021*, donde plantea determinar la eficiencia hidráulica de dos tipos de sección de canal; la metodología es no experimental, con muestreo no probabilístico de conveniencia en el tramo 0+000–2+022 km y registro de caudales en dos jornadas de campo; resultando una eficiencia promedio de 58,36 % y 71,53 % en el canal trapezoidal, y de 95,14 %, 92,33 %, 94,93 % y 95,60 % en el canal rectangular, evidenciando pérdidas significativas por infiltración y deterioro de paredes; concluye que el revestimiento y la ampliación de la sección trapezoidal son necesarios para reducir pérdidas y garantizar el caudal a todos los usuarios.

Sernaque Incio y Jiménez Castillo (2024) en su tesis Diseño hidráulico del canal El Palto, Lambayeque 2023, orientada a optimizar la conducción de agua en un canal de 6 420 m que riega 356,08 ha; la metodología es descriptiva no experimental, con análisis de infiltración y sedimentación sobre 200 m revestidos y el resto sin revestir; resultando una eficiencia de conducción del 57 % y proyección de aumento de la superficie irrigada en un 10 % (36 ha) al redimensionar la sección a 0,50 m × 0,95 m para Q = 0,5 m^3/s; concluye que el revestimiento y redimensionamiento propuesto mejoran la eficiencia hidráulica y la cobertura de riego.

Amado Trujillo (2023) en su tesis Inversión pública en infraestructura de riego y crecimiento económico en la región Huánuco, 2012–2021, el cual tiene como objetivo evaluar el impacto de la inversión en riego sobre la economía regional; la metodología es cuantitativa no experimental con regresión lineal simple sobre series de tiempo; resultando que una inversión superior a S/ 2,7 millones benefició a 148 familias, amplió el riego en 113 ha y se asoció a un crecimiento económico promedio anual del 3,7 %, calculándose que cada S/ 1 000 invertidos generan S/ 31 332 adicionales en valor agregado bruto (β = 31 332; $p < .05$); concluye que la inversión pública en infraestructura de riego tiene un efecto positivo y significativo en el desarrollo regional.

Quispe Pinto (2024), en su tesis Evaluación y simulación hidráulica del canal de riego Occosa tipo acueducto, Ayacucho-2022, centrada en mejorar la eficiencia hidráulica del tramo 0+540–0+790,60 m; la metodología es cuantitativa aplicada con modelamiento en HEC-RAS y HCanales, midiendo caudal máximo Q = 0,80 m^3/s y pendiente de 0,008636 m/m; resultando un desborde máximo de 0,23 m y velocidades entre 2,13 m/s y 2,63 m/s (dentro de los rangos admisibles 0,80–3,0 m/s); concluye que el diseño de sección de concreto de 0,50 m × 0,95 m con borde libre de 0,20 m optimiza la eficiencia hidráulica del canal.

Mendoza y Pérez (2024), en su tesis *Propuesta de un sistema de riego automatizado por microaspersión para las áreas verdes de la Universidad Nacional de Jaén,* en la que se evalua la viabilidad técnica y económica de la automatización; la metodología es diseño experimental con PLC Siemens S7-1200 y sensores de humedad; resultando una eficiencia hídrica del 80 % y una reducción del consumo de agua del 30 % frente a sistemas convencionales, con un costo estimado de S/ 25 979; concluye que la automatización por microaspersión es técnicamente viable y rentable para mejorar la eficiencia de riego.

2.1.3 A nivel regional y local

Según Torre Pérez y Vega (2021), en la tesis “Diseño hidráulico de sifón invertido del cruce canal de riego quebrada Sonccoyuma, Antabamba – Apurímac”. Cuyo objetivo fue determinar cuál es la mejor propuesta de diseño hidráulico del sifón invertido del cruce canal de riego quebrada Sonccoyuma. Donde la metodología de investigación fue un diseño de investigación aplicada con recopilación de datos de campo y modelamiento hidráulico en HEC-RAS. Resultando que para un tramo de 1 779,90 m de tubería PVC-O de 710 mm de diámetro y 169,70 m de hierro dúctil DN 700 mm, una pérdida de carga total de 6,64 m y una presión de llegada de 2,17 m, garantizando velocidades entre 0,80 m/s y 3,0 m/s. Se concluyó que el sifón invertido propuesto optimiza la transmisión del caudal y evita desbordes en pendientes pronunciadas.

Según Carazas Montoya (2022), en la tesis “Oferta y demanda de agua de riego de los usuarios del Canal Mariño de Abancay 2017–2018” en la se evalúa la oferta y demanda de agua de riego, donde la metodología de investigación es cuantitativa descriptiva con inventario de fuentes y mediciones de caudal en tres ríos y 3 230 m de entubado. Resultando para el balance hídrico se determinó un superávit de 45 L/s de octubre a junio y déficits de 29 L/s en julio, 99 L/s en agosto y 118 L/s en setiembre, concluye que hay la necesidad de obras de regulación y almacenamiento para cubrir el déficit estacional.

Según Rojas (2021), en el estudio “Comportamiento del flujo en canales abiertos por cambios de rugosidad – canal Sahuinto, Abancay, Apurímac”, donde su objetivo es evaluar cómo la rugosidad influye en la eficiencia hidráulica; la metodología fue no experimental-transversal con aforos en cuatro tramos revestidos y no revestidos; resultando que la velocidad media en el canal revestido osciló entre 0,7300 m/s y 0,2680 m/s, frente a 0,3680 m/s–0,1670 m/s en el no revestido (mejora de eficiencia > 40 %); concluye que el revestimiento aumenta significativamente la eficiencia hidráulica.

Según Velazque Huallpa (2022), en su tesis “Análisis de la eficiencia hidráulica en la estructura del canal de irrigación distrito de Toraya, provincia de Aymaraes, Apurímac”, centrada en cuantificar la eficiencia de conducción en tramos revestidos y no revestidos; la metodología fue de investigación de campo con aforos en un canal de 3 777,89 m alimentado por tres quebradas; resultando una eficiencia hidráulica promedio del 85 % en tramos revestidos versus 60 % en no revestidos, con pérdidas por infiltración de 20 L/s en época seca; concluye que se debe revestir los tramos críticos y regular el caudal mediante compuertas ajustables.

Según Álvarez et al. (2022), en su tesis “Diseño de canal colector y su relación con la disponibilidad hídrica en Apurímac, 2024”, la cual tiene por objetivo relacionar el diseño de un canal colector con la disponibilidad hídrica; la metodología fue cuantitativa con levantamiento topográfico, perfil longitudinal y análisis de curva de nivel; resultando un coeficiente canal-disponibilidad r = 0,614 (moderado) y un diseño de sección de 0,45 m de solera, 20 cm de talud libre y pendiente de 1,6 % que garantiza un caudal de 0,10 m³/s con velocidad óptima de 0,80–1,20 m/s; concluye que el diseño estandarizado mejora la disponibilidad hídrica en un 15 % respecto a la condición actual.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Mejoramiento de la infraestructura de riego

El mejoramiento de la infraestructura de riego se entiende como el proceso sistemático de intervención en redes de captación, conducción y distribución de agua que busca optimizar el balance hídrico, reducir pérdidas y aumentar la confiabilidad del suministro. Incluye desde obras de revestimiento y sellado de canales hasta la modernización de estructuras de control, como compuertas y medidores, así como la incorporación de tecnologías de automatización y monitoreo remoto (FAO, 2017). Su propósito central es asegurar que el caudal diseñado llegue al punto de uso con mínima merma, mejorando la productividad agrícola y la sostenibilidad del recurso hídrico.

Técnicas de intervención

- Revestimiento de canales
- Rehabilitación de compuertas y cámaras de medición
- Pérdidas por infiltración

EC- 1 Caudal de infiltración

$$\boldsymbol{Qinf = Qin - Qout} \quad (1)$$

Donde:

$\boldsymbol{Qinf}$= caudal de infiltración (l/s)

$\boldsymbol{Qin}$**=** Caudal de entrada (l/s)

$\boldsymbol{Qout}$=Caudal de salida (l/s)

Pérdidas por evaporación:

EC- 2 Estimadas mediante Penman–Monteith

$$E_0 = \frac{(0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot (900/(T + 273)) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a))}{(\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2))} \quad (2)$$

Donde:

Eo = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

R_n = radiación neta en la superficie de cultivo (MJ/m²/día)

G = flujo de calor al suelo (MJ/m²/día)

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

T = temperatura media del aire (°C)

u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s = presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = presión de vapor actual (kPa)

2.2.2 Eficiencia de riego

La eficiencia de riego se define como el porcentaje del agua introducida al sistema que llega y es aprovechada por las raíces de los cultivos. Se compone de tres eficiencias parciales (FAO, 2003):

EC- 3 Eficiencia de conducción

$$\eta_c = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- *ηc* = eficiencia de conducción (%)
- *Qin* = caudal de entrada al canal (l/s)
- *Qout* = caudal de salida del canal (l/s)

EC- 4 Eficiencia de aplicación

$$\eta_a = \frac{V_{infiltrado}}{V_{suministrado}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

η_a = Eficiencia de aplicación (%)

$V_{infiltrado}$ = Volumen infiltrado (m³)

$V_{suministrado}$= Volumen suministrado (m³)

2.2.3 Aprovechamiento hídrico

El aprovechamiento hídrico evalúa la relación entre el volumen de agua efectivo consumido por el cultivo y el volumen total descargado en el sistema, integrando la eficiencia de riego con la respuesta productiva del cultivo (Molden et al., 2007).

EC- 5 Productividad del agua (Water Productivity, WP)

$$WP = \frac{Y}{ET_a} \qquad (5)$$

Donde:

WP = productividad del agua (kg/m³)

Y = rendimiento de cultivo (kg)

ET_a = evapotranspiración actual o real (m³)

EC- 6 Eficiencia hídrica del sistema

$$\eta_{SYS} = \eta_c \, x \, \eta_d \, x \, \eta_a \qquad (6)$$

Donde:
η_{SYS} = Eficiencia del sistema (%)
η_c = Eficiencia de conducción (adimensional)
η_d = Eficiencia de distribución (adimensional)
η_a= Eficiencia de aplicación (adimensional)

Factores condicionantes

Clima y suelo: El índice de cultivo (Kc) y la textura del suelo determinan la proporción de la necesidad de riego.

Prácticas de riego: Frecuencia y duración de turnos, y el mantenimiento de la red afectan directamente.

2.3. Definición de términos

Caudal

El caudal es la cantidad o volumen de agua que atraviesa una sección transversal de un conducto, cauce o canal en una unidad de tiempo. Este parámetro es básico en

hidráulica e hidrología, pues permite cuantificar la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico en un punto determinado, y es fundamental para el diseño, dimensionamiento y operación de estructuras hidráulicas, así como para la calibración de modelos hidrológicos. El caudal se expresa habitualmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s), litros por segundo (L/s) u otras unidades análogas. En términos operativos, se estima mediante la fórmula $Q = V / t$, donde Q es el caudal, V el volumen que pasa y t el intervalo temporal. La medición (aforo) requiere determinar la sección mojada y la velocidad del fluido, integrándolas para obtener el flujo volumétrico. (Comisión Nacional del Agua, s.f.; iAgua, 2024)

Caudal de salida

El caudal de salida se refiere al volumen de agua que abandona o se descarga desde un sistema, embalse o estructura hidráulica hacia otro punto aguas abajo o al ambiente externo, medido en una unidad de tiempo. Por ejemplo, en un embalse o presa, el caudal de salida observado es el flujo medido que sale por las compuertas, vertedores o turbinas, mientras que el caudal de salida simulado es el estimado mediante modelación hidráulica o hidrológica. Este concepto es esencial en balances hídricos de reservorios y para la operación segura de obras de control, pues permite garantizar que la cantidad de agua descargada cumpla con demandas aguas abajo, restricciones ambientales y criterios de seguridad estructural. (Comisión Nacional del Agua, s.f.)

Caudal de entrada

El caudal de entrada se define como el volumen de agua que ingresa a un sistema, embalse o estructura hidráulica desde su cuenca de captación o fuente, medido en una unidad de tiempo. Por ejemplo, en la operación de un embalse, el caudal de entrada observado corresponde al flujo que llega a través de la captación principal o vertedor de entrada; el caudal de entrada simulado es la proyección mediante modelos hidrológicos. Conocer este caudal es crucial para efectuar balances de agua, planificar el almacenamiento, regular descargas y dimensionar estructuras de derivación o compuertas, permitiendo una gestión eficiente y segura del recurso. (Comisión Nacional del Agua, s.f.)

Línea de conducción

La línea de conducción es el conjunto de tuberías, conductos y estructuras accesorios (cámaras de aire, válvulas, rompedor de presión, juntas de dilatación, entre otros) diseñados para transportar agua desde el punto de captación (río, pozo, embalse) hasta una planta de tratamiento, tanque de regulación o punto de distribución. Dependiendo del contexto, puede operar a gravedad o mediante bombeo. El diseño considera caudales máximos previstos, pérdidas de carga a lo largo del trayecto, características geométricas y topográficas, resistencia de los materiales y disposiciones para controlar presiones y evitar golpes de ariete. Una adecuada línea de conducción optimiza la eficiencia energética y asegura la entrega del agua con calidad y cantidad requeridas. (Orellana, 2005)

Línea de distribución

La línea de distribución es la red de tuberías, válvulas, medidores y elementos de control que conduce el agua desde tanques de almacenamiento o plantas de tratamiento hasta los usuarios finales o puntos de consumo. En sistemas de agua potable, su objetivo es mantener presiones adecuadas y caudales suficientes en cada ramal, preservando la calidad del agua y evitando infiltraciones indeseadas. El diseño de la red de distribución considera la demanda horaria y diaria, topografía, materiales de tubería, variaciones de presión y criterios de zonificación para facilitar operación y mantenimiento. Asimismo, busca minimizar pérdidas por fugas y optimizar la cobertura de suministro. (EADIC, 2025; SSWM, s.f.)

Volumen de agua

El volumen de agua se refiere a la cantidad de espacio ocupado por el agua en un sistema o contenedor, expresada en unidades como metros cúbicos (m^3) o litros (L). Es un concepto esencial en el cálculo de reservorios, tuberías, canales y cualquier infraestructura hidráulica, pues permite dimensionar capacidades de almacenamiento, transporte y suministro. El cálculo del volumen depende de la geometría de la sección (por ejemplo,

curvas de capacidad en embalses o área transversal en canales) y de la longitud o profundidad correspondiente. En la gestión de recursos hídricos, el volumen de agua también se emplea en balances hídricos de cuencas para estimar reservas y disponibilidades. (Universidad Católica Argentina, 2024)

Volumen infiltrado

El volumen infiltrado es la cantidad de agua que penetra en el suelo desde la superficie o desde una estructura de conducción (por ejemplo, canal sin revestir) durante un período específico, expresado en metros cúbicos o en milímetros de altura en el área considerada. Este volumen depende de la tasa de infiltración del suelo, que decrece con el tiempo conforme se satura, y de la duración de la presencia de agua en superficie. La evaluación del volumen infiltrado es crucial para el dimensionamiento de sistemas de riego por gravedad, estimación de recargas de acuíferos y modelación de escorrentía en cuencas. (Universidad del País Vasco, s.f.)

Volumen descargado

El volumen descargado es la cantidad total de agua liberada o extraída de un sistema o estructura hidráulica durante un intervalo de tiempo, expresada en unidades de volumen (m^3). Por ejemplo, en presas y embalses, se refiere al volumen que sale por compuertas o vertederos en un determinado periodo; en sistemas de riego, es el volumen entregado a los usuarios o canales secundarios. Este concepto es fundamental en balances hídricos para comparar volúmenes de entrada y salida, verificar cumplimiento de demandas y evaluar estrategias de operación de almacenamiento. (Comisión Nacional del Agua, s.f.)

Aforo de agua

El aforo es la operación técnica de medición del caudal en una sección transversal de un cuerpo de agua (río, arroyo, canal o vertido), que consiste en determinar la sección mojada y medir la velocidad del flujo para calcular el flujo volumétrico. Se emplean métodos puntuales (molinetes, correntómetros) o mediciones continuas (sensores acústicos o electromagnéticos). El aforo es indispensable para estimar la disponibilidad hídrica, calibrar

y validar modelos hidráulicos e hidrológicos, planificar concesiones de agua y diseñar infraestructuras. (Universidad de Salamanca, s.f.; Grupo Hidráulica, 2022)

Revestimiento de canal

El revestimiento de un canal corresponde a la aplicación de materiales (concreto, mortero, mampostería, geomembranas, colchones Reno, entre otros) sobre la sección mojada para reducir infiltraciones al subsuelo, evitar erosión y socavación de márgenes, y mejorar la eficiencia hidráulica al disminuir la rugosidad. El diseño del revestimiento considera impermeabilidad, resistencia mecánica, durabilidad, textura de la superficie (influyendo en pérdidas de carga), condiciones hidráulicas (caudales, velocidades, transporte de sedimentos) y costo. Un revestimiento adecuado prolonga la vida útil de la obra y minimiza pérdidas de agua. (Segura, s.f.)

Estructuras de control en canales

•Bocatoma: obra de captación construida en un cauce natural (río o arroyo) para desviar parte de su caudal hacia un canal de riego o sistema de abastecimiento. Incluye elementos como presas de baja altura, compuertas de regulación, vertederos de desborde y desarenadores para controlar sedimentos, considerando topografía, régimen de caudales y aspectos de conservación de la cuenca. (Autoridad Nacional del Agua, s.f.)

•Compuerta: dispositivo hidráulico-mecánico para abrir o cerrar parcialmente el paso del agua en canales, tuberías o presas. Permite controlar niveles y caudales mediante mecanismos graduables. Existen tipos como compuertas correderas, radiales, de sector o tambor, seleccionadas según requisitos operativos y condiciones hidromecánicas. (Ministerio de Agricultura del Perú, s.f.)

•Medidor de caudal: instrumento o estructura que permite cuantificar el flujo de agua en un canal o tubería. Puede incluir secciones calibradas (vertederos, canales de aforo), dispositivos electromecánicos o sensores acústicos/ultrasónicos para medición continua. Es esencial para monitoreo de consumo, gestión de concesiones y validación de modelos hidráulicos. (Grupo Hidráulica, 2022)

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos son observaciones cuantitativas de variables atmosféricas (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación solar, presión atmosférica, entre otras) recogidas por estaciones meteorológicas, satélites y redes de monitoreo. Se emplean para caracterizar el clima, alimentar modelos hidrológicos e hidráulicos (por ejemplo, cálculo de escorrentías y evaporación), estimar demandas de riego, prever fenómenos extremos (inundaciones, sequías) y apoyar la planificación de obras civiles. Estos datos suelen ser provistos por organismos como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en España o la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que estandarizan protocolos para asegurar calidad y comparabilidad. (Agencia Estatal de Meteorología [AEMET], s.f.; Organización Meteorológica Mundial, s.f.)

Evaporación

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua en superficie (suelo, canales, embalses) se transforma en vapor y pasa a la atmósfera. Está influida por factores meteorológicos (radiación solar, temperatura, humedad, viento), superficie expuesta y disponibilidad de agua. En el balance hídrico de sistemas de riego y embalses, la evaporación representa una pérdida significativa de volumen. Se estima mediante métodos empíricos y teóricos (por ejemplo, Penman o Penman-Monteith), como se detalla en manuales de la FAO para el cálculo de requerimientos hídricos de cultivos. (Allen, Pereira, Raes y Smith, 1998)

Pendiente en canales

La pendiente de un canal es la relación entre la variación de elevación del fondo del canal y la longitud horizontal recorrida, expresada en m/m o porcentaje. Esta inclinación determina la energía potencial que impulsa el flujo en canales a cielo abierto y, junto con la forma de la sección y la rugosidad, condiciona la velocidad y régimen de flujo (subcrítico, crítico o supercrítico). Para flujo uniforme, la pendiente normal se elige según la ecuación de Manning (Q=1nAR2/3S1/2Q = \tfrac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}Q=n1AR2/3S1/2), donde S

es la pendiente hidráulica aproximada. El diseño considera topografía, riesgos de sedimentación o erosión, criterios de seguridad y eficiencia hidráulica. (García Palacios, s.f.; FAO, s.f.)

Pérdidas hídricas

Las pérdidas hídricas comprenden todos los volúmenes de agua que no llegan a destino o se escapan durante transporte y uso, incluyendo:

- Infiltración: agua que penetra en el subsuelo desde canales sin revestir o tuberías no estancas.
- Evaporación: agua que se pierde a la atmósfera superficies expuestas.
- Fugas y roturas: en redes de tuberías y canalizaciones.
- Derrames: en bordes de canales o en operación de tanques.
- Percolación profunda y escorrentía no aprovechada: en riego.

La cuantificación y control de estas pérdidas, mediante revestimientos adecuados, mantenimiento de redes y prácticas operativas eficientes, es vital para optimizar el uso del recurso hídrico. (FAO, s.f.; Allen et al., 1998)

III. Metodología

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación hace referencia a la finalidad práctica o teórica del estudio. Según Hernández et al. (2014), una investigación aplicada tiene como propósito resolver problemas concretos mediante la utilización del conocimiento científico. Se enfoca en generar soluciones que tengan una aplicación directa en contextos específicos y busca transformar realidades.

En la presente investigación, el tipo fue **aplicada**, dado que se enfocó en evaluar el mejoramiento de la infraestructura de riego del canal Huallhuayoc en la localidad de Atumpata, con el objetivo de incrementar la eficiencia del riego y el aprovechamiento hídrico de los agricultores beneficiarios.

3.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación se refiere a la profundidad del análisis de las variables. Hernández et al. (2014) señalan que el nivel explicativo busca establecer las causas de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian, yendo más allá de la descripción de conceptos para responder por las causas de los eventos físicos o sociales.

En la presente investigación, el nivel fue **explicativo**, ya que se buscó determinar en qué medida el mejoramiento de la infraestructura de riego (variable independiente) influye en la eficiencia de riego y el aprovechamiento hídrico (variables dependientes), estableciendo una relación causa-efecto entre las variables estudiadas.

3.1.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación especifica el plan general para responder al problema de investigación. Según Hernández et al. (2014), los diseños pre-experimentales se caracterizan por analizar una sola variable y no existe manipulación de la variable

independiente ni se utiliza grupo control; se aplican cuando se evalúa el efecto de un tratamiento o intervención comparando condiciones "antes" y "después" o entre grupos con y sin intervención.

La presente investigación adoptó un diseño **pre-experimental**, ya que se comparó la eficiencia hidráulica entre el tramo de canal con mejoramiento (revestido con concreto, progresivas 0+000 a 0+800) y el tramo sin mejoramiento (canal de tierra, progresivas 0+800 a 1+871), evaluando el efecto de la infraestructura mejorada sobre las pérdidas hídricas y la eficiencia de conducción del agua.

3.1.4 Enfoque de investigación

El enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección de datos numéricos, el uso de herramientas de medición estandarizadas y el análisis objetivo de los resultados. Este enfoque permite identificar preatrones y evaluar magnitudes, con base en métodos estadísticos y técnicos normados (Hernández et al., 2014).

Se empleó un enfoque **cuantitativo**, pues se midieron caudales, longitudes, eficiencia hídrica y otros parámetros mediante aforos con vertederos calibrados, levantamiento topográfico con GPS diferencial y análisis hidrometeorológico, permitiendo sustentar técnicamente la evaluación del efecto del mejoramiento de la infraestructura sobre la eficiencia del sistema de riego.

Resumen del diseño metodológico:

Componente	Clasificación
Enfoque	Cuantitativo
Tipo	Aplicado
Nivel	Explicativo
Diseño	Pre-experimental

3.2. Ámbito temporal y espacial

3.2.1. Ámbito temporal

El “ámbito temporal” describe cuándo y cómo se recopilan los datos: estudios transversales (corte transversal) registran datos en un momento o periodo breve, ofreciendo una instantánea; estudios longitudinales registran datos en múltiples momentos para observar cambios o tendencias (Atlasti, 2024; ESAN, 2023). Los estudios transversales son útiles para describir estados y correlaciones, pero no determinan causalidad temporal; los longitudinales permiten analizar evolución y posibles relaciones causa-efecto, aunque requieren más tiempo y recursos.

Se realiza principalmente un estudio transversal: los aforos de caudal, levantamiento topográfico y entrevistas se recopilan en un periodo definido de campo (cinco días de medición en mayo de 2025). Se complementa con análisis retrospectivo de datos hidrometeorológicos del año anterior y hasta la fecha, para contextualizar la temporada de riego. No se hace seguimiento prolongado de caudales a lo largo de años, sino que se obtiene una “instantánea” representativa en condiciones reales. Este enfoque responde a limitaciones de tiempo y recursos, pero es suficiente para comparar tramos y proponer mejoras fundamentadas.

3.2.2. Ámbito espacial

El “ámbito espacial” delimita la zona geográfica donde se desarrolla el estudio: puede ser un caso único (estudio de caso), multisite o regional/nacional. La delimitación incluye coordenadas, descripción del entorno físico y justificación de la elección del área, y afecta la representatividad y generalización de resultados (Yin, 2018).

El estudio se ubica en la localidad de Atumpata, distrito de Abancay, región Apurímac, enfocándose en el canal Huallhuayoc. Se detallan coordenadas de la bocatoma y puntos de aforo: tramo revestido (0+000 a 0+800) y tramo de tierra (0+800 a 1+871) con altitud aproximada de 2,780 msnm. Se describen características del entorno agrícola y climático local. Esta delimitación espacial asegura que los hallazgos sean específicos para

la realidad altoandina de Atumpata, si bien algunas conclusiones podrían aplicarse en contextos similares con adaptación de parámetros locales.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La “población” es el conjunto completo de elementos que cumplen criterios definidos y sobre los cuales se desea generalizar los resultados (Lavrakas, 2008). En investigaciones sociales o de intervención se especifican características de ubicación, perfil demográfico o rol en el fenómeno: p. ej., “agricultores usuarios del sistema de riego X en temporada Y”. Una definición clara facilita la representatividad de la muestra y la validez de inferencias.

La población de interés está constituida por todos los usuarios del canal Huallhuayoc en la localidad de Atumpata – Abancay (agricultores y comité de riego), que emplean este sistema durante la campaña de 2025. Esto incluye a usuarios en ambos tramos (revestido y no revestido) y aquellos que participan en la operación y mantenimiento. Esta definición orientó la fase cualitativa (selección de entrevistados) y la contextualización del análisis cuantitativo de caudales y pérdidas, pues se pretende que las conclusiones y recomendaciones sean válidas para este grupo completo de regantes que dependen del canal.

3.3.2. Muestra

La “muestra” es un subconjunto representativo de la población seleccionado para la recolección de datos. Puede ser probabilística (aleatorio simple, estratificado, por conglomerados) o no probabilística (conveniencia, intencional). El tamaño y método de muestreo deben justificarse con criterios estadísticos o de saturación cualitativa (Cochran, 1977). Una muestra adecuada permite inferir resultados con el nivel de confianza deseado.

Para el componente cualitativo, se seleccionó una muestra intencional de 18 usuarios del canal Huallhuayoc, representativos de distintas ubicaciones (cabecera, medio y cola) y tipologías de uso, coordinada con el comité de riego (observación y entrevistas a 18 usuarios).

- Este tamaño buscó saturación de percepciones sobre eficiencia y equidad. En el componente cuantitativo de caudales, la “muestra” se refiere a puntos de aforo, no a personas: se eligieron puntos en progresivas 0+200 y 0+420 para el tramo revestido, y 1+000 y 1+200 para el tramo de tierra, basados en criterios técnicos de pendiente similar para comparabilidad
- Esta selección de puntos sirve para estimar pérdidas y eficiencia representativas de cada tramo.

3.4. Instrumentos

Los “instrumentos” son herramientas específicas para aplicar técnicas de recolección de datos, por ejemplo, cuestionarios, guías de entrevista, dispositivos de medición, formatos de registro, software de análisis. Deben calibrarse y validarse para garantizar precisión y confiabilidad (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista, 2014).

- Los instrumentos empleados fueron:
- Vertederos rectangulares calibrados: planchas de acero con coeficiente de descarga conocido, instalados en puntos de aforo para medir caudales.
- GPS diferencial FOIF A-90: para levantamiento topográfico de pendientes y secciones transversales.
- Formatos de registro de campo: plantillas para anotar tirante de agua, condiciones del canal y datos de aforo.
- Guía de entrevista semiestructurada: lista de preguntas sobre percepciones de eficiencia, equidad y uso de estructuras de control.
- Software de análisis: planillas y programas hidráulicos (p. ej., H-canales) para procesar aforos, y software estadístico/cualitativo para análisis de datos y codificación de entrevistas.

3.5. Procedimientos

Los “procedimientos” describen paso a paso la aplicación de técnicas e instrumentos: fases de preparación (revisión documental, permisos, calibración), recolección de datos (campo o laboratorio), registro y almacenamiento, aseguramiento de calidad (pilotos, validación), procesamiento y análisis preliminar, y documentación para replicabilidad (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista, 2014). Procedimientos claros maximizan validez y confiabilidad.

Los pasos fueron:

- Revisión documental y plan de campo: recopilación de datos hidrometeorológicos de SENAMHI, estudios previos y cronograma de aforos (mayo 2025).
- Coordinación y permisos: contacto con comité de regantes y autoridades locales para autorizar ingreso al canal y concertar entrevistas.
- Levantamiento topográfico: medición de pendientes longitudinales y secciones en ambos tramos para determinar puntos de aforo con pendientes similares.
- Instalación de vertederos: colocación hermética en progresivas 0+200 y 0+420 (tramo revestido) y 1+000 y 1+200 (tramo de tierra).
- Recolección de datos de caudal: tres aforos diarios por punto durante cinco días consecutivos, registrando tirante y calculando caudal.
- Recolección de datos hidrometeorológicos: descarga de registros de temperatura y precipitación para cálculo de evaporación con fórmula de Penman.
- Entrevistas semiestructuradas: realización de entrevistas a los 18 usuarios seleccionados, grabación o registro de respuestas según guía.
- Procesamiento de datos: cálculo de pérdidas por infiltración (diferencia de caudales), evaporación diaria, eficiencia hidráulica y equidad de distribución; codificación y análisis temático de entrevistas.
- Control de calidad: verificación por pares de registros de campo, consistencia de mediciones y coherencia en respuestas cualitativas.

3.6. Análisis de datos

El “análisis de datos” involucra el uso de métodos estadísticos y cualitativos para procesar la información y responder las preguntas de investigación. En cuantitativo se aplican estadística descriptiva (medias, desviaciones), comparaciones (pruebas de diferencia de medias), correlaciones o regresión; en cualitativo, codificación de textos, análisis temático o de contenido para extraer patrones y categorías emergentes (Creswell y Creswell, 2018; Braun y Clarke, 2006). Se evalúan validez interna y confiabilidad, y se reconoce limitaciones de los datos.

- Cuantitativo: se calcularon pérdidas por infiltración (diferencia de caudales entre entrada y salida en cada tramo), evaporación diaria con Penman, eficiencia hidráulica (caudal de salida/caudal de entrada) e índices de regulación y equidad de distribución. Se aplicó estadística descriptiva (promedios, rangos) y comparación de medias entre tramos (revestido vs. no revestido)
- Cualitativo: las entrevistas se transcribieron y codificaron identificando categorías como percepción de equidad, gestión de turnos, mantenimiento y uso de estructuras. Se empleó análisis temático para revelar patrones de opinión que expliquen diferencias en la percepción de eficiencia y distribución equitativa.

Triangulación: la combinación de resultados cuantitativos y cualitativos permitió interpretar de forma integral los hallazgos y fundamentar recomendaciones técnicas y de gestión participativa.

3.7. Consideraciones éticas

En nuestra investigación es garantizar confidencialidad, evitar causar daño, transparencia sobre objetivos y uso de datos, y, en su caso, aprobación por un comité de ética. Además, se debe respetar normas y valores culturales locales y devolver resultados a la comunidad (Orb, Eisenhauer y Wynaden, 2001). En estudios de campo, se explica claramente propósito, duración, beneficios y se permite la retirada voluntaria en cualquier momento.

Se gestionó consentimiento informado con todos los entrevistados (18 usuarios), explicando objetivo de la tesis, confidencialidad de sus opiniones y uso exclusivo de datos para fines académicos y comunitarios. Se garantizó anonimato en la presentación cualitativa, usando códigos o descripciones generales. En campo, se cuidó no interrumpir el riego ni dañar infraestructuras. Se coordinó con el comité de riego y autoridades locales para respetar normas comunitarias. Finalmente, se compartieron resultados resumidos con el comité de usuarios para retroalimentación y beneficio, asegurando devolución de hallazgos a la comunidad.

IV. Resultados

El presente capítulo expone y analiza los resultados obtenidos a partir del estudio comparativo de dos tramos del canal de riego Huallhuayoc, uno revestido con concreto y otro sin revestimiento (de tierra), en la localidad de Atumpata, distrito de Abancay, región Apurímac. El objetivo principal es evaluar la eficiencia hidráulica, las pérdidas hídricas por infiltración y evaporación, y la funcionalidad de las estructuras de control (bocatomas, compuertas y medidores de caudal), considerando tanto factores técnicos como condiciones reales de operación.

Para ello, se realizaron estudios hidrometeorológicos con datos de la estación meteorológica Granja San Antonio, se ejecutaron aforos de caudal durante 5 días en campo mediante el método del vertedero, y se calcularon las pérdidas por evaporación aplicando la fórmula de Penman. Además, se llevó a cabo un levantamiento topográfico del canal, identificando variaciones en la pendiente y estado de las estructuras existentes.

La investigación se centra en tres objetivos específicos: (1) analizar el impacto del revestimiento en la reducción de pérdidas hídricas, (2) comparar la eficiencia hidráulica entre ambos tipos de tramo y (3) evaluar la efectividad de las estructuras de control en la distribución equitativa y uso racional del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos permiten establecer relaciones claras entre el tipo de infraestructura, su estado de conservación y la eficiencia del sistema de riego. Asimismo, la discusión se fundamenta en datos empíricos, gráficos, cálculos hidráulicos y evidencia fotográfica, con el fin de sustentar conclusiones técnicas que orienten futuras decisiones sobre rehabilitación y manejo sostenible del recurso hídrico en zonas agrícolas altoandinas.

5.1 Resultados

Caracterización hidrometeorológica de la zona

La caracterización hidrometeorológica es un estudio importante en la etapa de diseño de los canales, ya que proporciona información detallada sobre las condiciones climáticas e hidrológicas que afectan el comportamiento del agua dentro del canal. Este análisis incluye parámetros como las precipitaciones, la temperatura y la humedad, los

cuales inciden directamente en el caudal de diseño propuesto en el gabinete. Factores como la evaporación excesiva o los desbordes causados por lluvias intensas pueden alterar el caudal previsto, afectando la eficiencia en la conducción del agua. En el caso del presente estudio, se ha utilizado la estación meteorológica GRANJA SAN ANTONIO, operada por SENAMHI, lo que asegura que las condiciones meteorológicas locales sean representadas de manera precisa y realista, permitiendo una evaluación más fiel del comportamiento del canal.

Por lo tanto, la estación meteorológica seleccionada, debido a su influencia directa sobre el canal de concreto, es la estación de GRANJA SAN ANTONIO, ubicada en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, región Apurímac.

Tabla 2

Estación meteorológica

Estación: GRANJA SAN ANTONIO					
Departamento:	**APURIMAC**	**Provincia:**	**ABANCAY**	**Distrito:**	**TAMBURCO**
Latitud:	**13°36'17.7'' S**	**Longitud:**	**72°51'24.9'' W**	**Altitud:**	**2780 msnm.**
Tipo:	**EMA - Meteorológica**	**Código:**	**47263360**		

Nota. En la tabla 2 describe la ubicación de la estación meteorológica de Tamburco. Fuente: SENAMHI.

Tabla 3

Registro de temperatura °C

REGISTRO DE TEMPERATURA (°C)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMA	24.5	22.1	22.7	23.8	22.4	23.7	22.9	24.3	25.9	26.9	26.7	23.1	26.9
MINIMA	7.7	9	8.9	8.4	6.6	4.7	3.9	6.4	7.8	8.3	9.7	8.7	3.9
MEDIA	16.1	15.55	15.8	16.1	14.5	14.2	13.4	15.35	16.85	17.6	18.2	15.9	15.4

Nota. Según la información presentada, la temperatura máxima registrada corresponde al mes de octubre, con un valor de 26.90 °C, mientras que la temperatura mínima se observó en los meses de julio, con 3.90 °C. Las tablas completas proporcionadas por el SENAMHI

se encuentran en los anexos, y la tabla actual es un extracto de dichas fuentes. Fuente: SENAMHI.

Tabla 4

Registro de Precipitación (mm/día) y humedad (%)

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN / HUMEDAD													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
PRECIPITACIÓN (mm/día)	15.1	16	13	11.6	8.6	10.4	0	3.8	7.8	6.3	7.9	19.6	19.6
HUMEDAD RELATIVA (%)	100	94	94	94	94	92	92	91	92	93	94	93	100

Nota. Según la tabla presentada, la precipitación máxima registrada corresponde al mes de diciembre, con un valor de 19.60 mm/día, mientras que la humedad relativa máxima se observó en el mes de enero, con 100.00%. Las tablas completas proporcionadas por el SENAMHI se encuentran en los anexos, y la tabla actual es un extracto de dichas fuentes. Fuente: SENAMHI.

Caracterización del canal

El canal de riego evaluado en esta investigación se ubica en el sector de Atumpata, Distrito de Abancay, en la región Apurímac. Este canal forma parte del proyecto Mariño y fue construido en el año 2010 por el Gobierno Regional de Apurímac, a través de su unidad ejecutora ProDesarrollo. Su caudal proviene de las aguas de la laguna Rontoccocha, la cual alimenta varios canales de la zona. La actividad predominante en el sector es la agricultura, por lo que el canal constituye una infraestructura fundamental para el desarrollo económico y social del sector.

En la investigación se planteó una comparación entre dos tramos del canal de riego Huallhuayoc, ubicado en la localidad de Atumpata, con el propósito de evaluar las diferencias en su funcionamiento hidráulico y social. Para ello, se diseñó un estudio aplicado que consistió en observar y analizar el comportamiento del agua en dos secciones del canal: una revestida con concreto y otra sin revestimiento (de tierra). Este enfoque

permitió identificar las variaciones en la eficiencia y las condiciones operativas del canal, tomando en cuenta las características físicas de cada tramo.

Durante el levantamiento topográfico del canal de riego se identificaron variaciones significativas en las pendientes longitudinales a lo largo de los tramos revestido y no revestido, lo cual incide directamente en el comportamiento hidráulico del flujo.

Figura 1

Levantamiento topográfico con GPS Diferencial

Nota. El levantamiento topográfico se realizó con GPS diferencial marca FOIF A-90. Fuente: Elaboración propia.

El tramo revestido en concreto, que comprende desde la progresiva 0+000 hasta la 0+800, presenta una pendiente inicial de 0.040 m/m entre los puntos 0+000 y 0+200. A partir de allí, la pendiente disminuye gradualmente a 0.030 m/m entre el 0+200 y el 0+420, seguido de 0.020 m/m entre el 0+420 y el 0+600, y finalmente alcanza una pendiente de 0.015 m/m en el último segmento, entre el 0+600 y el 0+800. Esta variación progresiva de la pendiente ha sido diseñada para permitir un flujo uniforme y evitar fenómenos de erosión o sobrepresión en el tramo revestido, considerando la capacidad hidráulica del canal y la protección del revestimiento.

A partir de la progresiva 0+800 hasta la 1+871, el canal adopta una sección de tierra con geometría variable. En este tramo, la pendiente se ajusta de manera natural al perfil topográfico del terreno. Se registró una pendiente de 0.012 m/m entre las progresivas 0+800 y 1+000, seguida por un aumento significativo a 0.030 m/m entre el 1+000 y el 1+200. Posteriormente, la pendiente disminuye de forma gradual: 0.010 m/m entre el 1+200 y el 1+500, 0.008 m/m entre el 1+500 y el 1+750, y finalmente 0.007 m/m entre el 1+750 y el 1+871. Esta secuencia de pendientes refleja la adaptación del canal a la topografía natural, permitiendo un flujo gravitacional constante, aunque con mayor susceptibilidad a procesos de erosión y sedimentación, propios de los canales sin revestimiento.

A lo largo del canal se encuentran distribuidas varias tomas laterales, las cuales permiten el abastecimiento de agua a parcelas agrícolas. Estas tomas se clasifican en dos tipos: T1 y T2. Las tomas T1 se localizan en las progresivas 0+125, 0+370, 0+590, 0+820, 1+060, 1+310, 1+555 y 1+790; mientras que las tomas T2 se ubican en las progresivas 0+210, 0+470, 0+710, 0+940, 1+190, 1+440 y 1+675. Esta distribución evidencia una planificación hidráulica destinada a cubrir eficientemente las necesidades de riego a lo largo del recorrido del canal.

Asimismo, se identificaron varias obras de arte hidráulicas relevantes en el tramo revestido. En el inicio del canal (km 0+000) se encuentra la estructura de la Bocatoma; le sigue un desarenador ubicado en la progresiva 0+020, y un medidor tipo RBC (Rectangular Broad-Crested) en la progresiva 0+030. Además, se observaron dos canoas, estructuras que permiten el cruce de agua sobre otros cursos o caminos, ubicadas en las progresivas 1+020 y 1+500, que cumplen una función clave en la continuidad hidráulica del canal.

Figura 2

Situación actual de la bocatoma

Nota. En la imagen se observa el estado actual de la bocatoma. Se constató que esta estructura se encuentra operando de manera eficiente, sin evidencias de obstrucción por sedimentos, material vegetal u otros elementos que puedan limitar el ingreso de agua al canal. La ubicación de la bocatoma permite un aprovechamiento adecuado del cauce natural, facilitando la derivación del caudal hacia el canal con mínima pérdida de carga y sin interferencias visibles. Asimismo, se observa un canal de ingreso sumergido que conduce el agua desde el punto de captación hasta la salida de la bocatoma, desde donde el flujo continúa hacia el canal. Fuente: Elaboración propia.

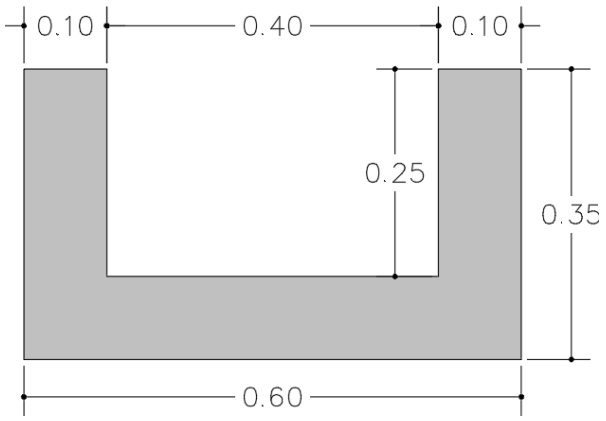
Figura 3

Situación actual del canal revestido

Nota: En la imagen se observa el estado actual del canal revestido en concreto. A lo largo de este tramo se observa la acumulación de sedimentos, presencia de musgo, hojas y otros residuos orgánicos. Esta situación viene afectando el desempeño hidráulico optimo del canal, al generar obstrucciones parciales al flujo, lo que reduce su capacidad de conducción y eficiencia. La limpieza de estos materiales se realiza actualmente de forma improvisada por parte de los usuarios, sin un cronograma de faenas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Sección del canal de concreto



Nota. El canal revestido mantiene una sección transversal constante desde la progresiva 0+030 hasta la 0+800. A lo largo de este tramo, se observó la presencia de juntas de dilatación espaciadas aproximadamente cada 9.00 metros, algunas de estas juntas presentan deficiencias, lo que podría comprometer la integridad del revestimiento si no se realiza un mantenimiento adecuado. Fuente: Elaboración propia.

Aforo de caudal.

Para la medición de caudales (aforo) se seleccionaron dos tramos del canal: uno correspondiente al tramo revestido de concreto y otro al tramo de tierra. En el canal revestido, los puntos de aforo se ubicaron en las progresivas 0+200 y 0+420; mientras que en el canal de tierra se establecieron en las progresivas 1+000 y 1+200. Estos tramos fueron seleccionados debido a que presentan una pendiente longitudinal similar, de 0.03

m/m, lo que permite realizar una comparación técnica más precisa entre ambos tipos de sección. En los puntos de aforo se utilizó el método del vertedero, previamente instalado para garantizar la precisión en la estimación del caudal. Este método consiste en inducir el paso del flujo a través de un vertedero de geometría rectangular, lo cual permite calcular el caudal con base en la altura del tirante aguas arriba del vertedero.

A continuación, se describe detalladamente el procedimiento seguido para la instalación, calibración y ejecución del aforo en cada uno de los tramos seleccionados.

Método del Vertedero.

El cálculo del caudal en el canal se realizó aplicando el método del vertedero rectangular, siguiendo los pasos detallados a continuación:

- **Colocación del vertedero:** Se instaló un vertedero rectangular fabricado en plancha de acero de ¼ de pulgada de espesor, instalado en la progresiva designada previamente para la medición del caudal. Para proporcionar una instalación hermética, el vertedero se instalado con una mezcla de cemento y yeso, sellando todas las uniones con el canal y evitando cualquier filtración que pudiera afectar la medición.
- **Medición de la altura del agua:** La medida se tomó perpendicularmente desde la superficie libre del agua hasta el vértice de la cresta del vertedero.
- **Aplicación de la fórmula para el vertedero rectangular:** Con los valores obtenidos, se aplicó la fórmula para el cálculo de caudal en un vertedero rectangular, que es:

EC- 7 *Caudal de aforo*

$$Q = C \times L \times h^{2/3} \qquad (7)$$

Donde:

Q= caudal en metros cúbicos por segundo (m³/s)

C= coeficiente de descarga (un factor adimensional que depende de la geometría y las condiciones particulares del vertedero)

L= longitud de cresta del vertedero (mts)

h= altura del agua sobre la cresta del vertedero (mts)

Cálculo de caudal. El aforo de caudales se realizó durante cinco días consecutivos: lunes 5, martes 6, miércoles 7, jueves 8 y viernes 9 de mayo del presente año. Una vez instalados los vertederos en los puntos previamente seleccionados, se procedió con la toma de datos. Durante cada jornada de medición, se realizaron tres aforos diarios por punto, con el objetivo de obtener un promedio representativo del caudal en cada tramo.

Para el cálculo de los caudales se empleó la fórmula correspondiente a vertederos de pared delgada con sección rectangular, considerando las condiciones de flujo crítico y las dimensiones del vertedero previamente calibrado. Este método permite estimar el caudal en función de la altura del tirante de agua aguas arriba del vertedero, bajo condiciones de carga total conocida y sin contracción lateral significativa.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los días y puntos de medición.

EC- 8 *Fórmula para vertederos de pared delgada (sección rectangular)*

$$Q = \frac{2}{3} C_d \times b \times \sqrt{2g} \times h^{2/3} \qquad (8)$$

Donde:

Q: caudal que fluye por el vertedero (m^3/s)

Cd: coeficiente de gasto (adimensional)

b: ancho de la parte superior (m)

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

h: carga sobre el vertedero (m)

Cd = 0.60

EC- 9 *Fórmula para vertederos de pared delgada (sección rectangular)*

$$C_d = 0.611 + 0.075 \times \frac{h}{w} \qquad (9)$$

Donde:

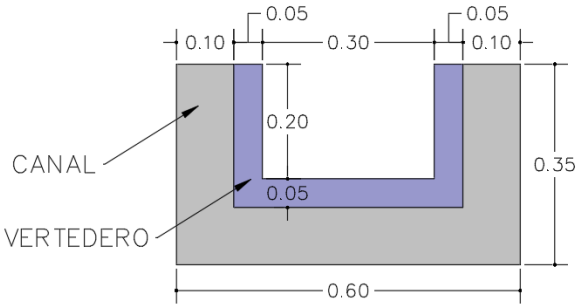
Cd = Coeficiente de descarga (adimensional)

h = Altura de carga hidráulica sobre el vertedero (m)

w = Espesor del vertedero o ancho del borde superior (m)

Figura 5

Sección del vertedero en canal revestido



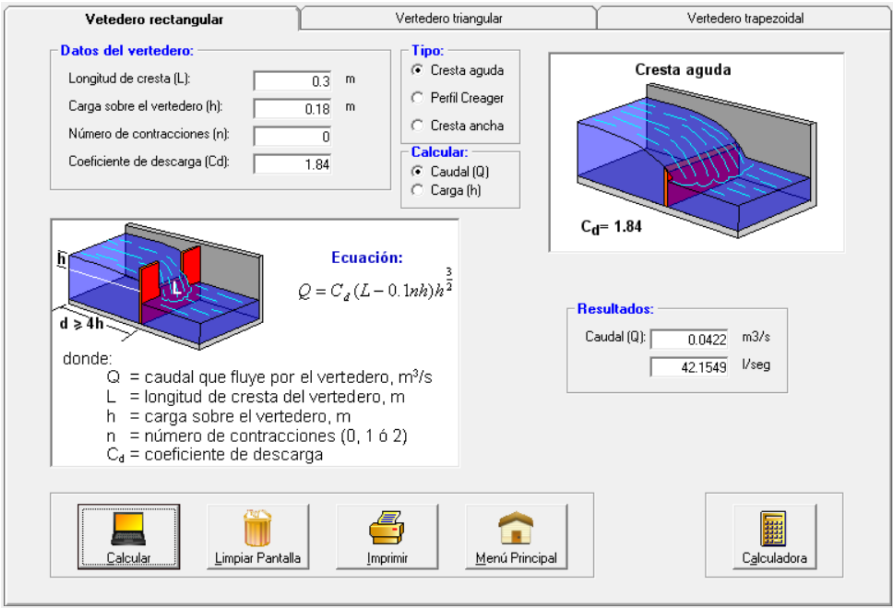
Nota. Se observa la imagen las medidas del canal revestido Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los aforos realizados en el canal, los cuales fueron efectuados mediante la medición de los caudales a través de un vertedero de pared delgada, específicamente diseñado para este tipo de medición en secciones rectangulares. Los aforos se llevaron a cabo en los puntos críticos del canal, ubicados en los kilómetros 02+000 y 02+600, y se realizaron tres mediciones diarias durante los días establecidos (lunes 05, martes 06, miércoles 07, jueves 08 y viernes 09 de mayo). Estos procedimientos permitieron obtener datos precisos para el cálculo de los caudales, los cuales fueron analizados bajo condiciones controladas para garantizar la exactitud de las mediciones y la fiabilidad de los resultados. Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar el comportamiento hidráulico del canal, con el fin de determinar su

capacidad de conducción y posibles ajustes necesarios para mejorar su eficiencia operativa.

Figura 6

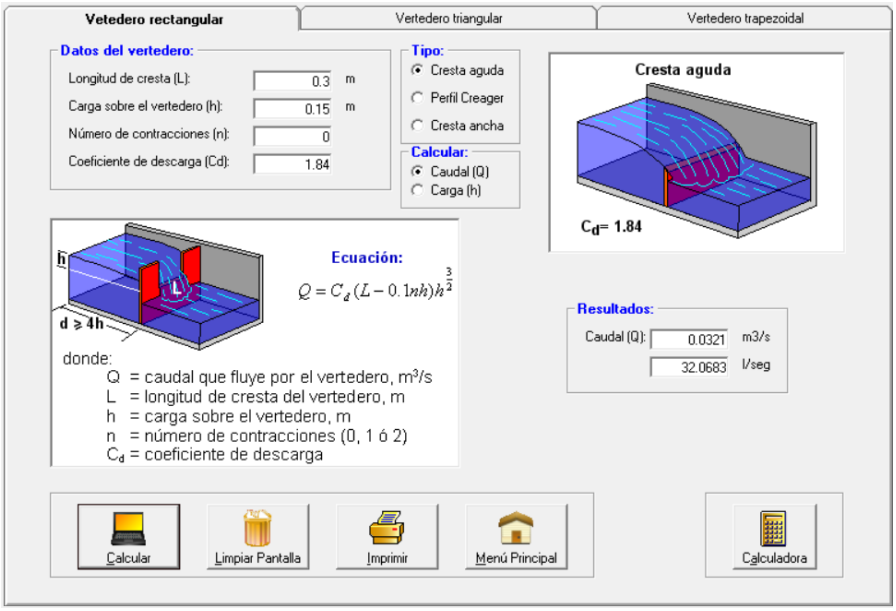
Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 0+200)



Nota. el caudal registrado el día 05.05.2025 en el kilómetro 0+200 es de 42.1549 l/s. Fuente: H canales V 3.1-

Figura 7

Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 0+200)

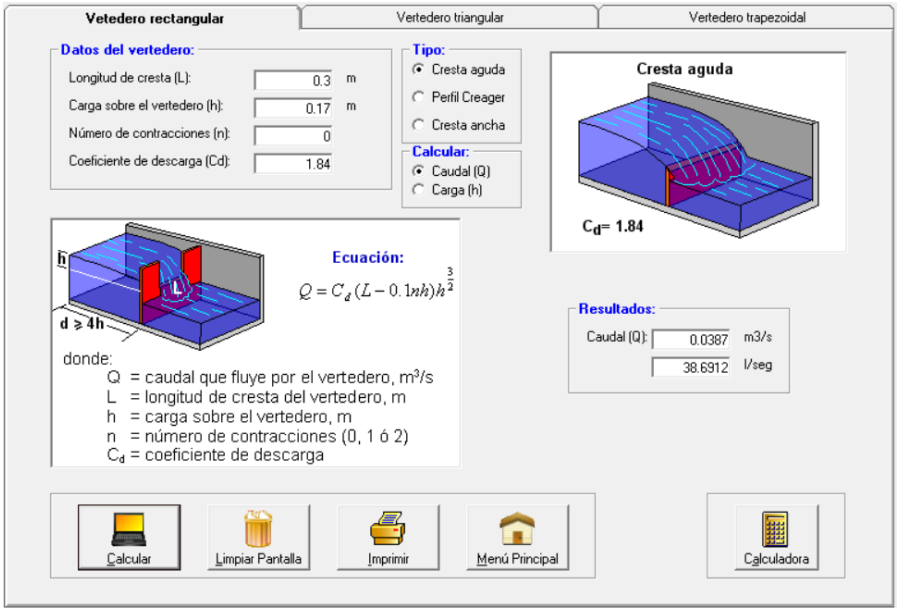


Nota. el caudal registrado el día 06.05.2025 en el kilómetro 0+200 es de 32.0683 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 8

Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 0+200)

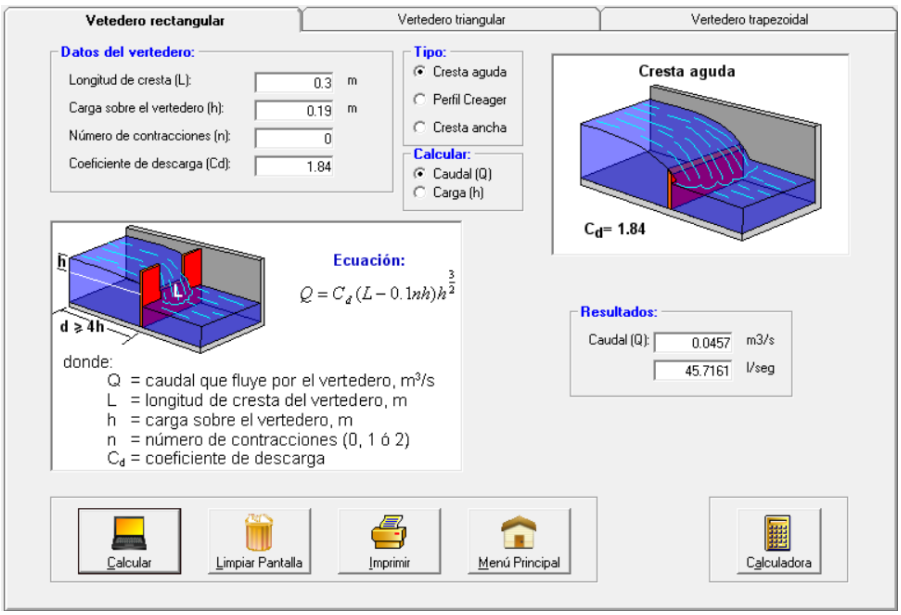


Nota. el caudal registrado el día 07.05.2025 en el kilómetro 0+200 es de 38.6912 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 9

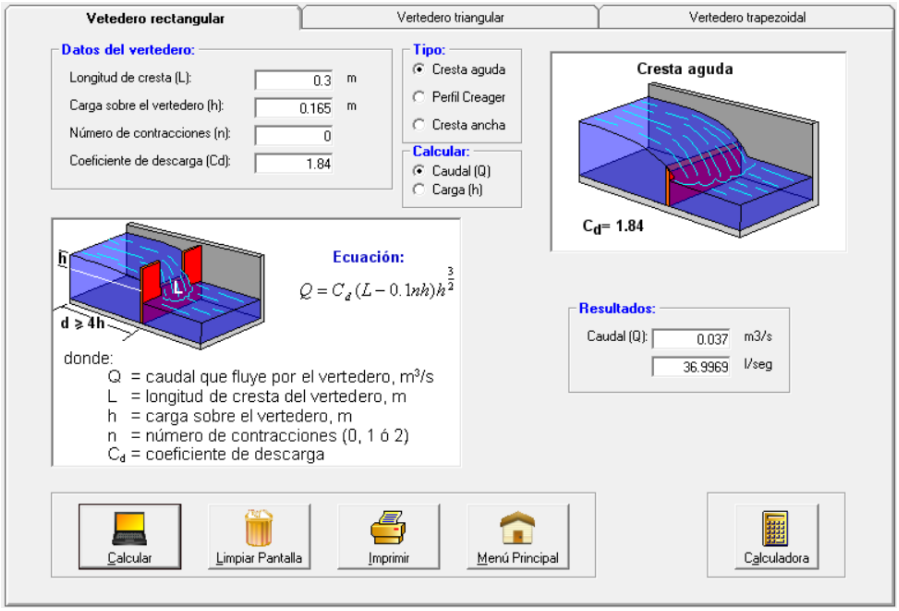
Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 0+200)



Nota. el caudal registrado el día 08.05.2025 en el kilómetro 0+200 es de 45.7161 l/s Fuente: H canales V 3.1.

Figura 10

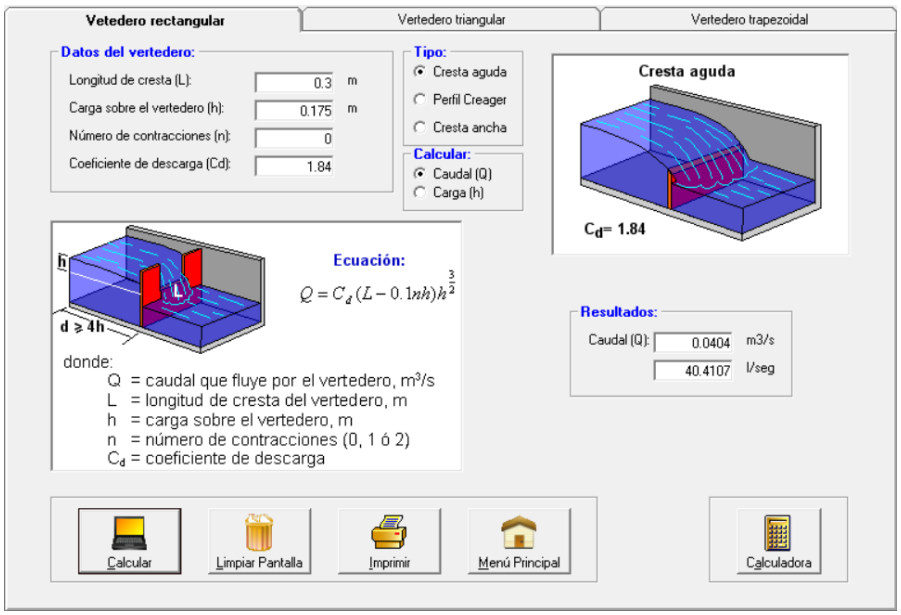
Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 0+200)



Nota. el caudal registrado el día 09.05.2025 en el kilómetro 0+200 es de 36.9969 l/s. Fuente: H canales V 3.1

Figura 11

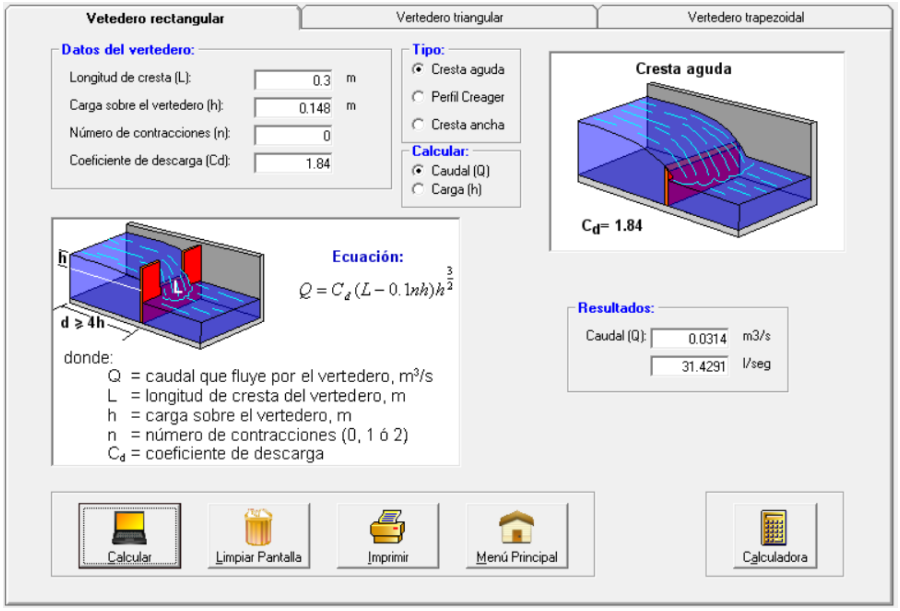
Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 0+420)



Nota. el caudal registrado el día 05.05.2025 en el kilómetro 0+420 es de 40.4107 l/s. Fuente: H canales V 3.1

Figura 12

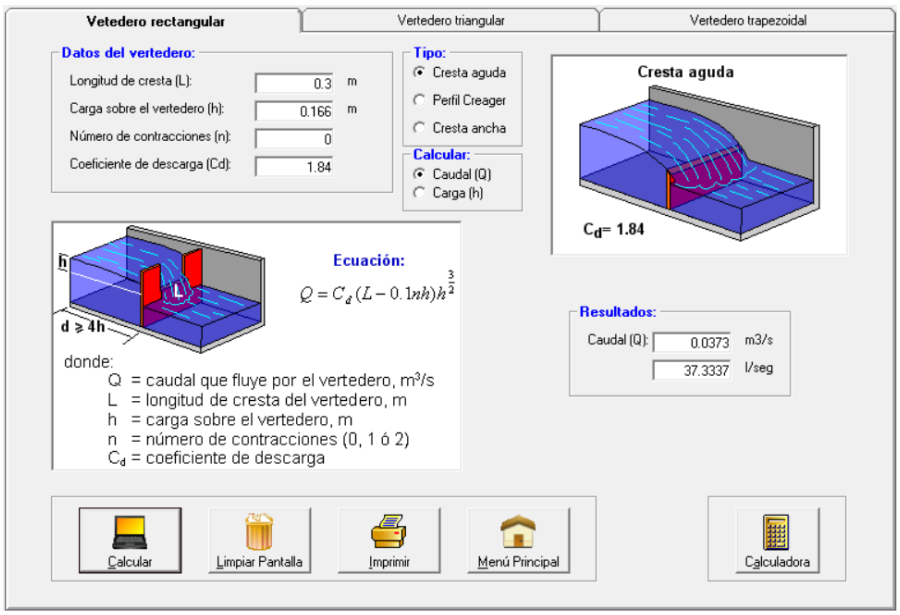
Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 0+420)



Nota. el caudal registrado el día 06.05.2025 en el kilómetro 0+420 es de 31.429 Funete: H canales V 3.1 l/s.

Figura 13

Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 0+420)

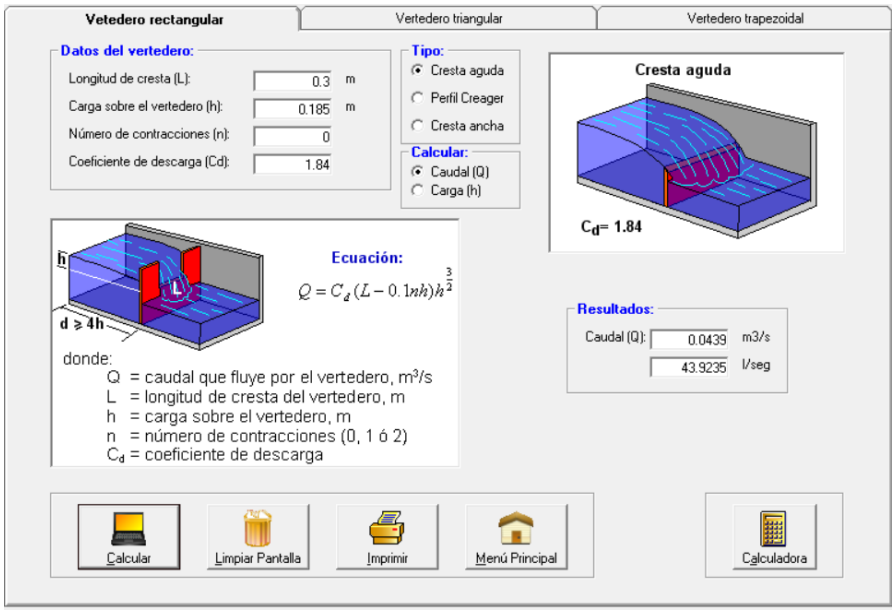


Nota. el caudal registrado el día 07.05.2025 en el kilómetro 0+420 es de 37.3337 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 14

Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 0+420)

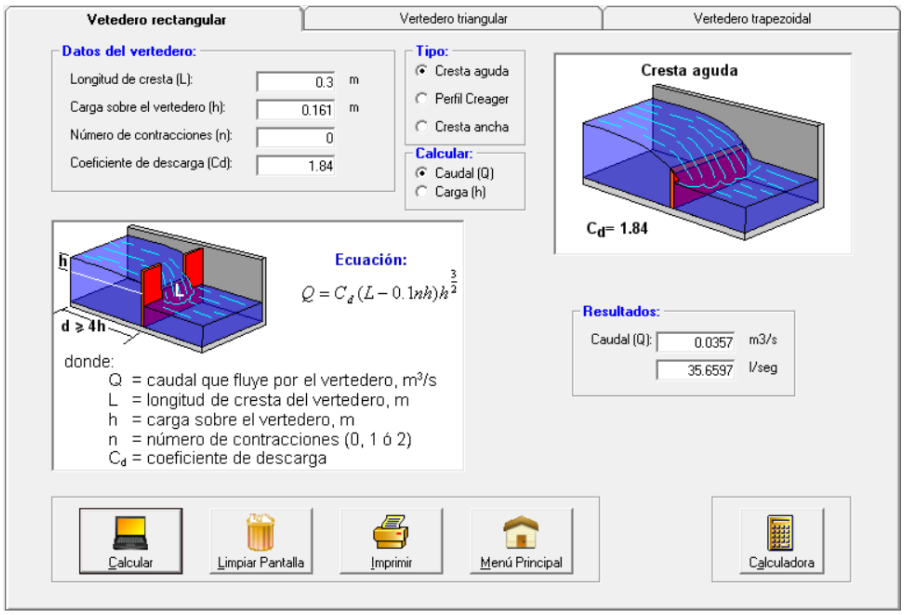


Nota. el caudal registrado el día 08.05.2025 en el kilómetro 0+420 es de 43.9235 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 15

Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 0+420)



Nota. el caudal registrado el día 09.05.2025 en el kilómetro 0+420 es de 35.6597 l/s.Fuente: H canales V 3.1.

Tabla 5

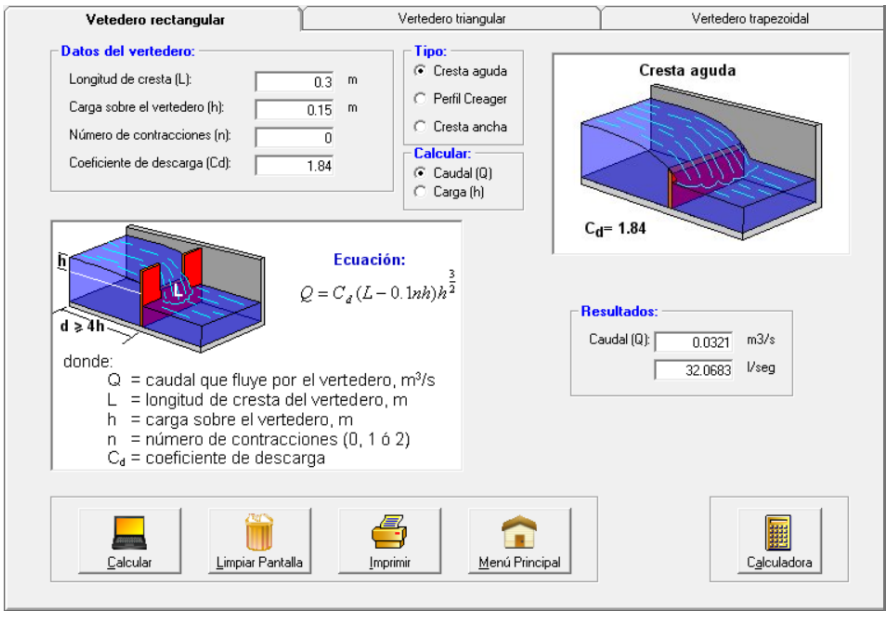
Resultados del caudal aforado en el canal revestido

N°	Fecha	Caudal (lit/seg)		Perdidas en el tramo
		km 00+200	km 00+420	(lit/seg)
1	**05/05/2025**	42.1549	40.4107	1.7442
2	**06/05/2025**	32.0683	31.4291	0.6392
3	**07/05/2025**	38.6912	37.3337	1.3575
4	**08/05/2025**	45.7161	43.9235	1.7926
5	**09/05/2025**	36.9969	35.6597	1.3372

Nota. Los aforos se realizaron en el tramo comprendido entre las progresivas 0+200 y 0+420, bajo condiciones hidráulicas controladas. Durante el proceso de medición, se supervisó que el tramo no presentara obstrucciones, recortes, ni interferencias físicas que pudieran alterar el flujo o los niveles del tirante. Dado que las condiciones del canal eran estables y representativas, los datos obtenidos en este tramo son considerados válidos, confiables y técnicamente consistentes para el análisis del comportamiento hidráulico del canal revestido. Fuente: Elaboración propia.

Figura 16

Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 1+000)

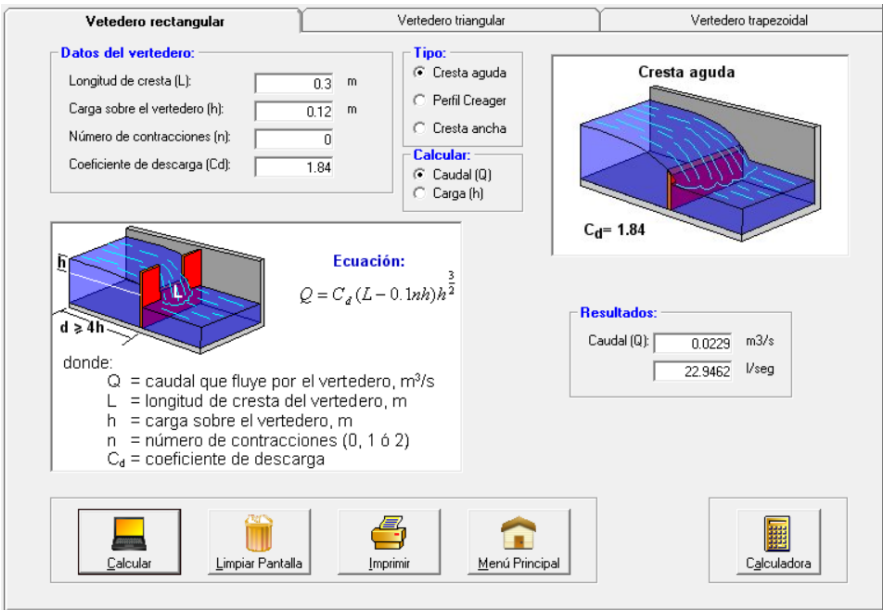


Nota. el caudal registrado el día 05.05.2025 en el kilómetro 1+000 es de 32.0683 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 17

Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 1+000)

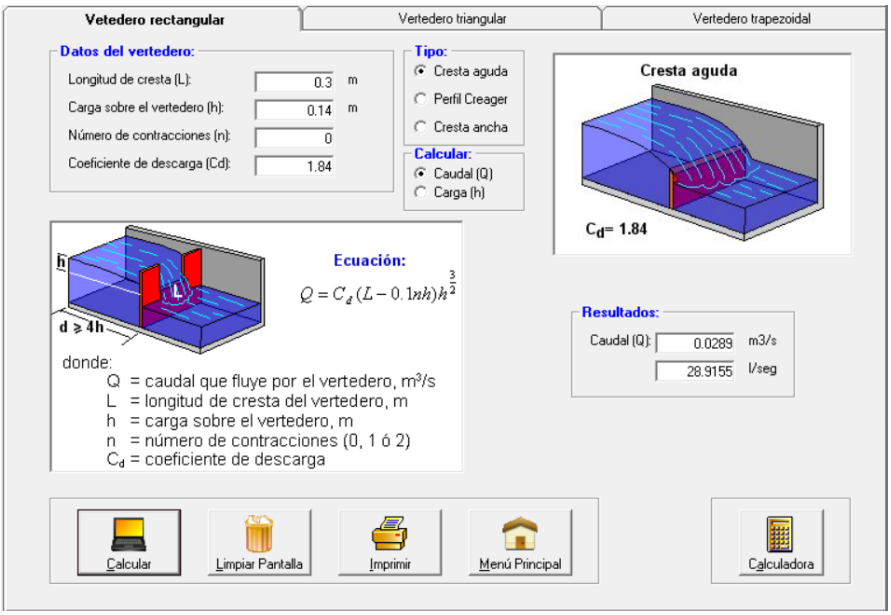


Nota. el caudal registrado el día 06.05.2025 en el kilómetro 1+000 es de 22.9462 l/s.

Fuente: H canales V 3.1

Figura 18

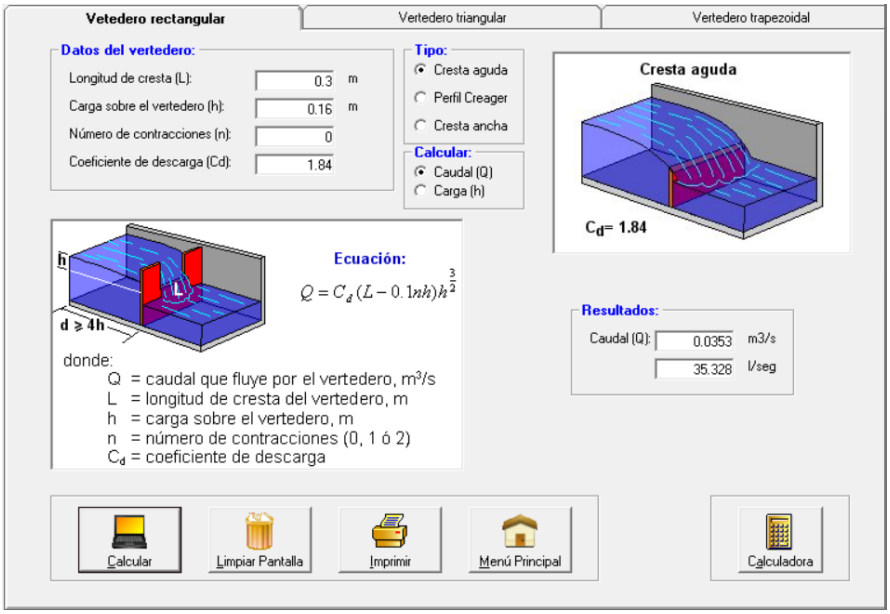
Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 1+000)



Nota. el caudal registrado el día 07.05.2025 en el kilómetro 1+000 es de 28.9155 l/s. Fuente: H canales V 3.1.

Figura 19

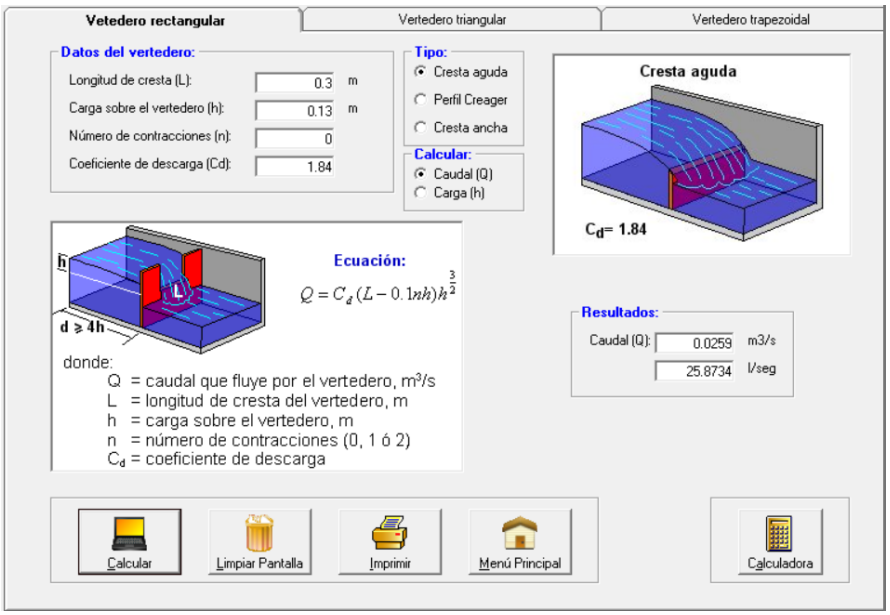
Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 1+000)



Nota. el caudal registrado el día 08.05.2025 en el kilómetro 1+000 es de 35.3280 l/s. Fuente: H canales V 3.1.

Figura 20

Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 1+000)

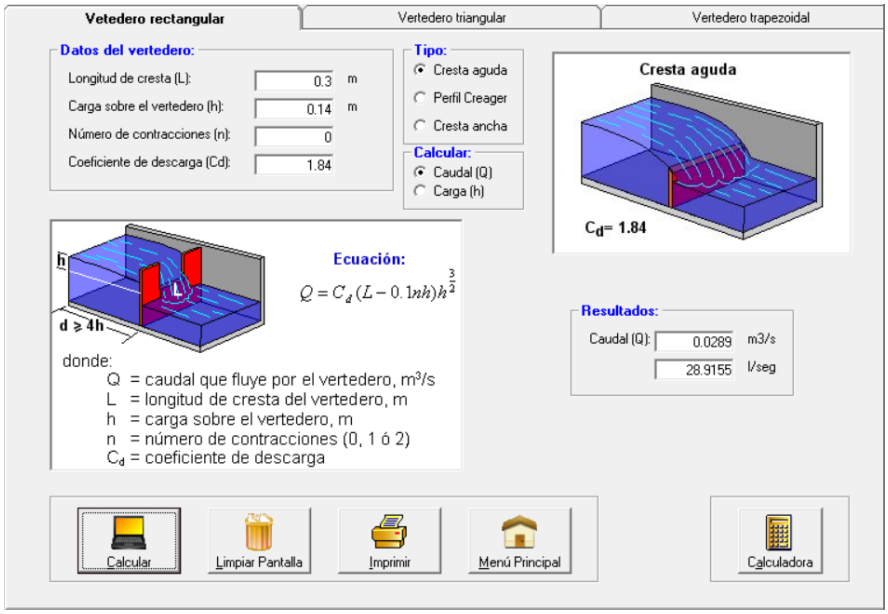


Nota. el caudal registrado el día 09.05.2025 en el kilómetro 1+000 es de 25.8734 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 21

Caudal aforado el día 05.05.2025 (km 1+200)

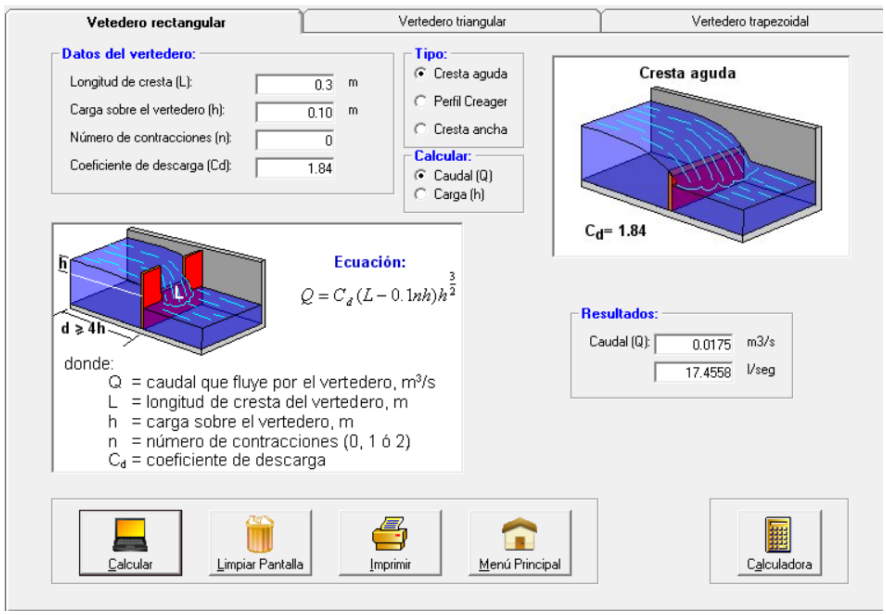


Nota. el caudal registrado el día 05.05.2025 en el kilómetro 1+200 es de 28.9155 l/s.

Fuente: H canales V 3.1

Figura 22

Caudal aforado el día 06.05.2025 (km 1+200)

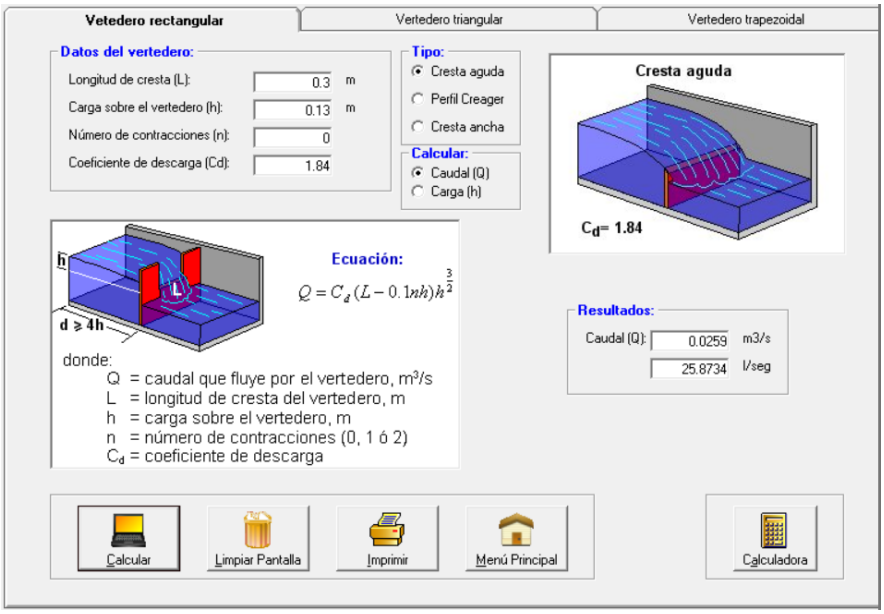


Nota. el caudal registrado el día 06.05.2025 en el kilómetro 1+200 es de 17.4558 l/s.

Fuente: H canales V 3.1.

Figura 23

Caudal aforado el día 07.05.2025 (km 1+200)

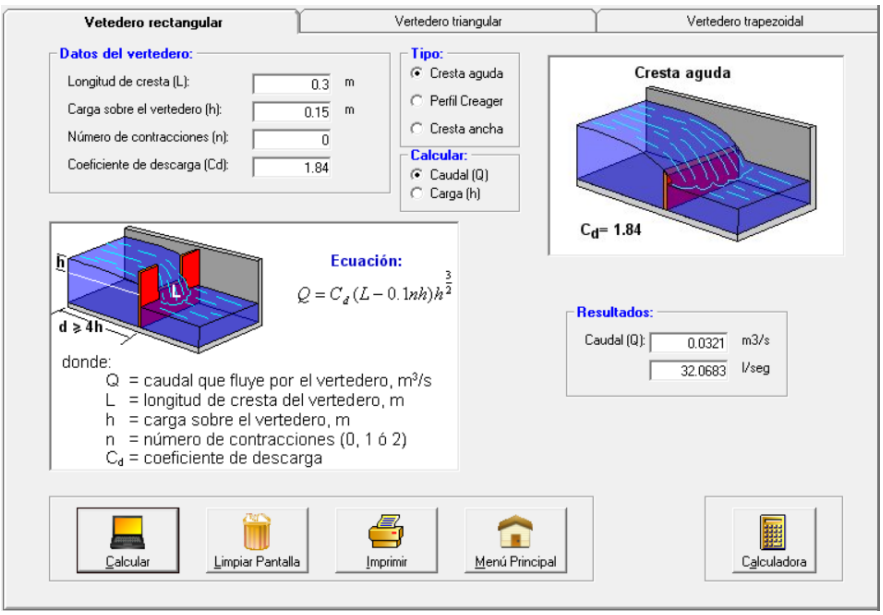


Nota. el caudal registrado el día 07.05.2025 en el kilómetro 1+200 es de 25.8734 l/s.

Fuente: H canales V 3.1

Figura 24

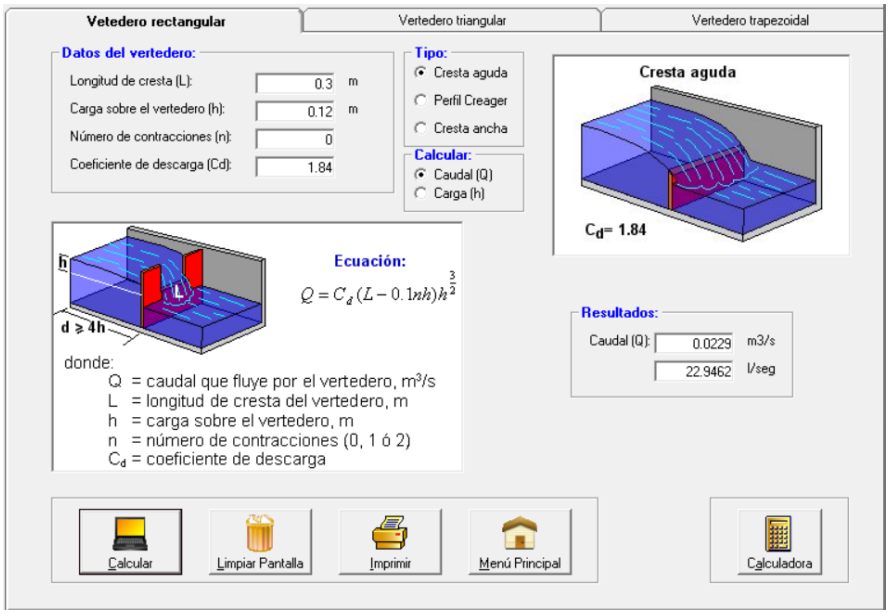
Caudal aforado el día 08.05.2025 (km 1+200)



Nota. el caudal registrado el día 08.05.2025 en el kilómetro 1+200 es de 32.0683 l/s. Fuente: H canales V 3.1

Figura 25

Caudal aforado el día 09.05.2025 (km 1+200)



Nota. el caudal registrado el día 09.05.2025 en el kilómetro 1+200 es de 22.9462 l/s. Fuente: H canales V 3.1

Tabla 6

Resultados del caudal aforado en el canal de tierra

N°	Fecha	Caudal (lit/seg)		Perdidas en el tramo
		km 01+000	km 01+200	(lit/seg)
1	**05/05/2025**	32.0683	28.9155	3.1528
2	**06/05/2025**	22.9462	17.4558	5.4904
3	**07/05/2025**	28.9155	25.8734	3.0421
4	**08/05/2025**	35.328	32.0683	3.2597
5	**09/05/2025**	25.8734	22.9462	2.9272

Nota. Los aforos se realizaron en el tramo comprendido entre las progresivas 01+000 y 01+200, bajo condiciones hidráulicas controladas. Durante el proceso de medición, se supervisó que el tramo no presentara obstrucciones, recortes, ni interferencias físicas que

pudieran alterar el flujo o los niveles del tirante. Dado que las condiciones del canal eran estables y representativas, los datos obtenidos en este tramo son considerados válidos, confiables y técnicamente consistentes para el análisis del comportamiento hidráulico del canal de tierra. Fuente: Elaboración propia.

Caudal de Evaporación (Q evp)

Se procede a estimar el cálculo de la evaporación en un periodo de 365 días del año 2024 y 2025, teniendo en cuenta la fórmula de Penman, donde se tendrá en cuenta las temperaturas diarias del año 2024 y 2025 según datos del Senamhi. Asimismo, se considera la elevación del distrito de Abancay de h=2780 msnm

Se procede a estimar el cálculo de evaporación para el día 01 de enero del 2025 en base a la fórmula de Penman

EC- 10 *Temperatura media diaria*

$$T = \frac{T_{max} T_{min}}{2} \qquad (10)$$

Donde:

T = Temperatura media diaria (°C)

T_{max} = Temperatura máxima del día (°C)

T_{min}= Temperatura mínima del día (°C)

$$T = \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2}$$

$$T = \frac{(20.80 + 10.10)}{2}$$

$$T = 15.45°$$

EC- 11 *Rango de temperatura diaria (R)*

$$R = T_{max} T_{min} \qquad (11)$$

Donde:

R = Rango térmico diario (°C)

T_{max} = Temperatura máxima (°C)

T_{min} = Temperatura mínima (°C)

$$R = (T_{\max} - T_{\min})$$
$$R = (20.80 - 10.10)$$
$$T = 10.70°$$

EC- 112*Corrección de temperatura por altitud*

$$T_m = T + 0.006h \quad (12)$$

Donde:

T_m= Temperatura corregida por altitud (°C)

T= Temperatura medida a nivel de referencia (°C)

h = Altitud del lugar (m)

$$T_m = T + 0.006h$$
$$T_m = 15.45 + 0.006 \times 3166$$
$$T_m = 34.446°$$

EC- 13 *Diferencia de temperatura medias de los meses más cálidos y más fríos (Rann).*

$$T_{prom\times dia\times 365} = \frac{(T_1 + T_2 + \ldots + T_{365})}{365} \quad (13)$$

Donde:

$T_{prom\times dia\times 365}$= Temperatura promedio anual (°C)

$\frac{(T_1+T_2+\ldots+T_{365})}{365}$ = Temperaturas diarias (°C)

$$T_{prom\times dia\times 365} = 15.354°$$

$$T_{frio} < T_{prom\times dia\times 365} < T_{calido}$$

$$T_{frio} < 15.354° < T_{calido}$$

Se observa que los meses cálidos son setiembre, octubre, noviembre y diciembre, y los meses más fríos son enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto.

$$T_{calido} = \frac{(16.07 + 16.83 + 16.91 + 15.64)}{4}$$

$$T_{calido} = 16.36°$$

$$T_{frio} = \frac{(15.27 + 15.26 + 14.82 + 14.99 + 14.95 + 14.28 + 14.05 + 15.14)}{8}$$

$$T_{frio} = 14.84°$$

EC- 14 *Rango térmico entre estaciones (Rann)*

$$R_{rann} = T_{calido} - T_{frio} \quad (14)$$

Donde:

R_{rann} = Rango térmico anual (°C)

T_{calido}= Temperatura media del mes más cálido (°C)

T_{frio} = Temperatura media del mes más frío (°C)

$R_{rann} = T_{calido} - T_{frio}$

$R_{rann} = 1.512$

EC- 15 *Estimación del déficit térmico (T-Td)*

$$(T - T_d) = 0.0023h + 0.37T + 0.53R + 0.35R_{ann} - 10.9° \quad (15)$$

Donde:

T = Temperatura media del aire (°C)

T_d= Temperatura del punto de rocío (°C)

h = Altitud del lugar (m)

R = Rango térmico diario (°C)

R_{ann}= Rango térmico anual (°C)

$(T - T_d) = 0.0023h + 0.37T + 0.53R + 0.35R_{ann} - 10.9°$

$(T - T_d) = 8.300$

EC- 16 *Evapotranspiración con método Hargreaves-Samani*

$$E_0 = \frac{700T_m/(100 - A) + 15(T - T_d)}{(80 - T)}(mm/dia) \quad (16)$$

Donde:

E0 = Evapotranspiración estimada (mm/día)

T_m = Temperatura media mensual (°C)

A = Altitud (m.s.n.m)

T = Temperatura media del aire (°C)

T_d= Temperatura media del punto de rocío (°C)

$$E_0 = \frac{700T_m/(100 - A) + 15(T - T_d)}{(80 - T)}(mm/dia)$$

$E_0 = 6.255mm/dia$

Por lo que, para el día 01 de enero del 2025 se tiene una evaporación de 6.255 mm/día, este cálculo se repetirá para los 365 días del año.

Tabla 7

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de enero del 2025

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/01/2025	20.8	10.1	15.45	10.7	1.517	34.446	3166	13.66	8.3	6.255
02/01/2025	17.8	9.1	13.45	8.7	1.517	32.446	3166	13.66	6.5	5.418
03/01/2025	17.7	10.5	14.1	7.2	1.517	33.096	3166	13.66	5.95	5.425
04/01/2025	21	10.5	15.75	10.5	1.517	34.746	3166	13.66	8.31	6.324
05/01/2025	21.8	8.9	15.35	12.9	1.517	34.346	3166	13.66	9.43	6.495
06/01/2025	19.7	11.5	15.6	8.2	1.517	34.596	3166	13.66	7.03	5.993
07/01/2025	23.4	11.9	17.65	11.5	1.517	36.646	3166	13.66	9.54	7.06
08/01/2025	19.8	12	15.9	7.8	1.517	34.896	3166	13.66	6.93	6.035
09/01/2025	15.4	11.1	13.25	4.3	1.517	32.246	3166	13.66	4.09	4.837
10/01/2025	20.8	11.5	16.15	9.3	1.517	35.146	3166	13.66	7.82	6.299
11/01/2025	21.3	9.7	15.5	11.6	1.517	34.496	3166	13.66	8.8	6.382
12/01/2025	21.4	10.5	15.95	10.9	1.517	34.946	3166	13.66	8.59	6.436
13/01/2025	24.5	7.7	16.1	16.8	1.517	35.096	3166	13.66	11.77	7.217
14/01/2025	23.1	11.2	17.15	11.9	1.517	36.146	3166	13.66	9.57	6.946
15/01/2025	24	10.9	17.45	13.1	1.517	36.446	3166	13.66	10.31	7.197
16/01/2025	22.4	12.4	17.4	10	1.517	36.396	3166	13.66	8.65	6.787
17/01/2025	17.4	10.7	14.05	6.7	1.517	33.046	3166	13.66	5.66	5.35
18/01/2025	22.2	10.9	16.55	11.3	1.517	35.546	3166	13.66	9.03	6.676
19/01/2025	22.8	10.9	16.85	11.9	1.517	35.846	3166	13.66	9.45	6.848

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
20/01/2025	16.7	10.4	13.55	6.3	1.517	32.546	3166	13.66	5.27	5.16
21/01/2025	17.7	9.7	13.7	8	1.517	32.696	3166	13.66	6.22	5.406
22/01/2025	17.5	9	13.25	8.5	1.517	32.246	3166	13.66	6.32	5.337
23/01/2025	15.3	9.7	12.5	5.6	1.517	31.496	3166	13.66	4.51	4.784
24/01/2025	19.8	10	14.9	9.8	1.517	33.896	3166	13.66	7.62	5.977
25/01/2025	21.6	10.4	16	11.2	1.517	34.996	3166	13.66	8.77	6.489
26/01/2025	19.1	10.7	14.9	8.4	1.517	33.896	3166	13.66	6.88	5.806
27/01/2025	19.9	10.7	15.3	9.2	1.517	34.296	3166	13.66	7.45	6.025
28/01/2025	18.9	10.9	14.9	8	1.517	33.896	3166	13.66	6.67	5.757
29/01/2025	19.7	9.7	14.7	10	1.517	33.696	3166	13.66	7.65	5.941
30/01/2025	17.5	11.2	14.35	6.3	1.517	33.346	3166	13.66	5.56	5.389
31/01/2025	20.1	11.6	15.85	8.5	1.517	34.846	3166	13.66	7.28	6.107

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de enero una temperatura promedio mensual de 15.275 °C y una evaporación promedio de 6.070 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 8

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de febrero del 2025

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/02/2025	19	11.2	15.1	7.8	1.517	34.096	3166	13.66	6.63	5.793
02/02/2025	21.2	10.6	15.9	10.6	1.517	34.896	3166	13.66	8.41	6.383
03/02/2025	21.9	9.2	15.55	12.7	1.517	34.546	3166	13.66	9.4	6.533
04/02/2025	18.4	9	13.7	9.4	1.517	32.696	3166	13.66	6.96	5.574
05/02/2025	21.3	11.2	16.25	10.1	1.517	35.246	3166	13.66	8.28	6.43
06/02/2025	20.4	11	15.7	9.4	1.517	34.696	3166	13.66	7.7	6.172
07/02/2025	20.4	10.8	15.6	9.6	1.517	34.596	3166	13.66	7.77	6.166
08/02/2025	20.3	11.1	15.7	9.2	1.517	34.696	3166	13.66	7.6	6.147
09/02/2025	20.3	10.1	15.2	10.2	1.517	34.196	3166	13.66	7.94	6.117
10/02/2025	20.5	10.4	15.45	10.1	1.517	34.446	3166	13.66	7.98	6.181
11/02/2025	21.2	10.2	15.7	11	1.517	34.696	3166	13.66	8.55	6.37
12/02/2025	19	10.4	14.7	8.6	1.517	33.696	3166	13.66	6.91	5.771
13/02/2025	18.8	10.9	14.85	7.9	1.517	33.846	3166	13.66	6.59	5.73
14/02/2025	19.8	11.2	15.5	8.6	1.517	34.496	3166	13.66	7.21	6.012
15/02/2025	18.7	10.6	14.65	8.1	1.517	33.646	3166	13.66	6.63	5.695
16/02/2025	19.5	11.4	15.45	8.1	1.517	34.446	3166	13.66	6.92	5.935
17/02/2025	18.1	10.4	14.25	7.7	1.517	33.246	3166	13.66	6.27	5.529
18/02/2025	15.2	10.8	13	4.4	1.517	31.996	3166	13.66	4.05	4.78
19/02/2025	22.1	10.7	16.4	11.4	1.517	35.396	3166	13.66	9.02	6.64
20/02/2025	18.3	10.7	14.5	7.6	1.517	33.496	3166	13.66	6.31	5.59

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
21/02/2025	19.7	10.8	15.25	8.9	1.517	34.246	3166	13.66	7.27	5.973
22/02/2025	20	11.6	15.8	8.4	1.517	34.796	3166	13.66	7.21	6.079
23/02/2025	20.4	10.7	15.55	9.7	1.517	34.546	3166	13.66	7.81	6.163
24/02/2025	20.5	10.6	15.55	9.9	1.517	34.546	3166	13.66	7.91	6.188
25/02/2025	21.8	9.2	15.5	12.6	1.517	34.496	3166	13.66	9.33	6.505
26/02/2025	18	11.3	14.65	6.7	1.517	33.646	3166	13.66	5.88	5.525
27/02/2025	22.1	9.4	15.75	12.7	1.517	34.746	3166	13.66	9.47	6.596
28/02/2025	20.8	11.7	16.25	9.1	1.517	35.246	3166	13.66	7.75	6.306

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de febrero una temperatura promedio mensual de 15.266 °C y una evaporación promedio de 6.032 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 9

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de marzo del 2025

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/03/2025	19.3	10.3	14.8	9	1.517	33.796	3166	13.66	7.16	5.85
02/03/2025	18.4	10.3	14.35	8.1	1.517	33.346	3166	13.66	6.52	5.607
03/03/2025	19.3	10.3	14.8	9	1.517	33.796	3166	13.66	7.16	5.85
04/03/2025	17	10.9	13.95	6.1	1.517	32.946	3166	13.66	5.31	5.249

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
05/03/2025	16.4	9.8	13.1	6.6	1.517	32.096	3166	13.66	5.26	5.069
06/03/2025	19.3	10.3	14.8	9	1.517	33.796	3166	13.66	7.16	5.85
07/03/2025	21.1	8.9	15	12.2	1.517	33.996	3166	13.66	8.93	6.301
08/03/2025	15.3	11.6	13.45	3.7	1.517	32.446	3166	13.66	3.85	4.821
09/03/2025	18.8	10.4	14.6	8.4	1.517	33.596	3166	13.66	6.77	5.717
10/03/2025	19.1	11.4	15.25	7.7	1.517	34.246	3166	13.66	6.64	5.826
11/03/2025	18.4	10.8	14.6	7.6	1.517	33.596	3166	13.66	6.34	5.62
12/03/2025	16.2	11.2	13.7	5	1.517	32.696	3166	13.66	4.63	5.046
13/03/2025	18.6	9.3	13.95	9.3	1.517	32.946	3166	13.66	7	5.635
14/03/2025	16.1	10.3	13.2	5.8	1.517	32.196	3166	13.66	4.87	5.001
15/03/2025	20.4	10.7	15.55	9.7	1.517	34.546	3166	13.66	7.81	6.163
16/03/2025	16	10.2	13.1	5.8	1.517	32.096	3166	13.66	4.83	4.974
17/03/2025	20.7	10	15.35	10.7	1.517	34.346	3166	13.66	8.26	6.225
18/03/2025	20.7	8.9	14.8	11.8	1.517	33.796	3166	13.66	8.64	6.191
19/03/2025	19.4	11.1	15.25	8.3	1.517	34.246	3166	13.66	6.95	5.899
20/03/2025	19.8	11	15.4	8.8	1.517	34.396	3166	13.66	7.27	6.006
21/03/2025	19.9	12.1	16	7.8	1.517	34.996	3166	13.66	6.97	6.066
22/03/2025	21.5	10.8	16.15	10.7	1.517	35.146	3166	13.66	8.56	6.474
23/03/2025	22.7	11.5	17.1	11.2	1.517	36.096	3166	13.66	9.18	6.841
24/03/2025	22.1	11.1	16.6	11	1.517	35.596	3166	13.66	8.88	6.654
25/03/2025	19	9.1	14.05	9.9	1.517	33.046	3166	13.66	7.36	5.736
26/03/2025	21.3	9	15.15	12.3	1.517	34.146	3166	13.66	9.04	6.359
27/03/2025	19.9	11.4	15.65	8.5	1.517	34.646	3166	13.66	7.21	6.045
28/03/2025	18.6	9.7	14.15	8.9	1.517	33.146	3166	13.66	6.87	5.645

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
29/03/2025	20	9.6	14.8	10.4	1.517	33.796	3166	13.66	7.9	
30/03/2025	22.4	11.1	16.75	11.3	1.517	35.746	3166	13.66	9.1	6.02
31/03/2025	17.6	10.7	14.15	6.9	1.517	33.146	3166	13.66	5.81	6.74

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de marzo una temperatura promedio mensual de 14.824°C y una evaporación promedio de 5.835 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 10

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de abril del 2025

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/04/2025	19.5	10.2	14.85	9.3	1.517	33.846	3166	13.66	7.34	5.901
02/04/2025	15.5	9.3	12.4	6.2	1.517	31.396	3166	13.66	4.79	4.828
03/04/2025	18.9	8.4	13.65	10.5	1.517	32.646	3166	13.66	7.53	5.691
04/04/2025	20.8	11.9	16.35	8.9	1.517	35.346	3166	13.66	7.68	6.312
05/04/2025	16	10.9	13.45	5.1	1.517	32.446	3166	13.66	4.59	4.988
06/04/2025	19.9	9.8	14.85	10.1	1.517	33.846	3166	13.66	7.76	5.999
07/04/2025	19	11.1	15.05	7.9	1.517	34.046	3166	13.66	6.67	5.79
08/04/2025	18.5	11.2	14.85	7.3	1.517	33.846	3166	13.66	6.28	5.657
09/04/2025	16.8	10.5	13.65	6.3	1.517	32.646	3166	13.66	5.3	5.188

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
10/04/2025	21	10.1	15.55	10.9	1.517	34.546	3166	13.66	8.44	6.311
11/04/2025	18.6	10.1	14.35	8.5	1.517	33.346	3166	13.66	6.73	5.655
12/04/2025	21.6	8.7	15.15	12.9	1.517	34.146	3166	13.66	9.36	6.433
13/04/2025	18.7	11.3	15	7.4	1.517	33.996	3166	13.66	6.38	5.714
14/04/2025	17.9	11.1	14.5	6.8	1.517	33.496	3166	13.66	5.88	5.493
15/04/2025	22.5	8.8	15.65	13.7	1.517	34.646	3166	13.66	9.96	6.688
16/04/2025	22.9	9.6	16.25	13.3	1.517	35.246	3166	13.66	9.97	6.829
17/04/2025	19.9	10.5	15.2	9.4	1.517	34.196	3166	13.66	7.52	6.019
18/04/2025	23.3	10.5	16.9	12.8	1.517	35.896	3166	13.66	9.95	6.978
19/04/2025	19.9	10.4	15.15	9.5	1.517	34.146	3166	13.66	7.55	6.016
20/04/2025	15.3	9.3	12.3	6	1.517	31.296	3166	13.66	4.64	4.777
21/04/2025	18.4	10.1	14.25	8.3	1.517	33.246	3166	13.66	6.58	5.602
22/04/2025	20.8	10	15.4	10.8	1.517	34.396	3166	13.66	8.33	6.252
23/04/2025	22.5	9.4	15.95	13.1	1.517	34.946	3166	13.66	9.76	6.709
24/04/2025	23.8	10.1	16.95	13.7	1.517	35.946	3166	13.66	10.45	7.107
25/04/2025	21.6	9.4	15.5	12.2	1.517	34.496	3166	13.66	9.11	6.456
26/04/2025	21.8	8.5	15.15	13.3	1.517	34.146	3166	13.66	9.57	6.482
27/04/2025	21.3	10	15.65	11.3	1.517	34.646	3166	13.66	8.69	6.391
28/04/2025	19.4	9.2	14.3	10.2	1.517	33.296	3166	13.66	7.61	5.846
29/04/2025	20.4	11.9	16.15	8.5	1.517	35.146	3166	13.66	7.39	6.2
30/04/2025	18.8	11.9	15.35	6.9	1.517	34.346	3166	13.66	6.25	5.757

Nota. De la tabla anterior, se determina para el mes de abril una temperatura promedio mensual de 14.991 °C y una evaporación promedio de 6.002 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 11

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de mayo del 2025

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/05/2025	22.2	10.9	16.55	11.3	1.517	35.546	3166	13.66	9.03	6.676
02/05/2025	20	9.5	14.75	10.5	1.517	33.746	3166	13.66	7.94	6.017
03/05/2025	16.8	11	13.9	5.8	1.517	32.896	3166	13.66	5.13	5.199
04/05/2025	18.9	10.9	14.9	8	1.517	33.896	3166	13.66	6.67	5.757
05/05/2025	17.4	10.3	13.85	7.1	1.517	32.846	3166	13.66	5.8	5.341
06/05/2025	20.1	10.1	15.1	10	1.517	34.096	3166	13.66	7.8	6.062
07/05/2025	21.5	9.5	15.5	12	1.517	34.496	3166	13.66	9.01	6.431
08/05/2025	21.1	10.3	15.7	10.8	1.517	34.696	3166	13.66	8.45	6.345
09/05/2025	20.9	8.6	14.75	12.3	1.517	33.746	3166	13.66	8.89	6.237
10/05/2025	19.6	10.2	14.9	9.4	1.517	33.896	3166	13.66	7.41	5.928
11/05/2025	18.9	9.8	14.35	9.1	1.517	33.346	3166	13.66	7.05	5.728
12/05/2025	20.6	9.5	15.05	11.1	1.517	34.046	3166	13.66	8.36	6.182
13/05/2025	20.7	9.9	15.3	10.8	1.517	34.296	3166	13.66	8.3	6.221
14/05/2025	21.8	8.7	15.25	13.1	1.517	34.246	3166	13.66	9.5	6.489
15/05/2025	20.7	9.1	14.9	11.6	1.517	33.896	3166	13.66	8.57	6.197
16/05/2025	22.4	9.1	15.75	13.3	1.517	34.746	3166	13.66	9.79	6.67
17/05/2025	22.2	8.5	15.35	13.7	1.517	34.346	3166	13.66	9.85	6.593
18/05/2025	22.2	7.5	14.85	14.7	1.517	33.846	3166	13.66	10.2	6.56
19/05/2025	20.5	9.5	15	11	1.517	33.996	3166	13.66	8.29	6.154
20/05/2025	20.9	9.8	15.35	11.1	1.517	34.346	3166	13.66	8.48	6.274

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
21/05/2025	18.7	9.8	14.25	8.9	1.517	33.246	3166	13.66	6.9	5.674
22/05/2025	21.4	10.2	15.8	11.2	1.517	34.796	3166	13.66	8.69	6.426
23/05/2025	20.7	11.4	16.05	9.3	1.517	35.046	3166	13.66	7.78	6.268
24/05/2025	21.3	10.4	15.85	10.9	1.517	34.846	3166	13.66	8.55	6.404
25/05/2025	17.2	10.1	13.65	7.1	1.517	32.646	3166	13.66	5.73	5.284
26/05/2025	20.7	8.5	14.6	12.2	1.517	33.596	3166	13.66	8.78	6.179
27/05/2025	20.9	6.6	13.75	14.3	1.517	32.746	3166	13.66	9.58	6.176
28/05/2025	20.6	7.8	14.2	12.8	1.517	33.196	3166	13.66	8.95	6.131
29/05/2025	21.5	9.7	15.6	11.8	1.517	34.596	3166	13.66	8.94	6.438
30/05/2025	19.5	8.5	14	11	1.517	32.996	3166	13.66	7.92	5.854
31/05/2025	22.3	7.2	14.75	15.1	1.517	33.746	3166	13.66	10.37	6.578

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de mayo una temperatura promedio mensual de 14.953 °C y una evaporación promedio de 6.144 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 12

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de junio del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/06/2024	23.1	7.6	15.35	15.5	1.517	34.346	3166	13.66	10.81	6.815
02/06/2024	21.7	7.8	14.75	13.9	1.517	33.746	3166	13.66	9.74	6.432

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
03/06/2024	22.1	7.1	14.6	15	1.517	33.596	3166	13.66	10.26	6.519
04/06/2024	21.3	7.4	14.35	13.9	1.517	33.346	3166	13.66	9.59	6.309
05/06/2024	20.9	6.8	13.85	14.1	1.517	32.846	3166	13.66	9.51	6.182
06/06/2024	21.5	6.1	13.8	15.4	1.517	32.796	3166	13.66	10.18	6.323
07/06/2024	21.5	5.8	13.65	15.7	1.517	32.646	3166	13.66	10.28	6.314
08/06/2024	22.6	5.6	14.1	17	1.517	33.096	3166	13.66	11.14	6.607
09/06/2024	21.3	4.7	13	16.6	1.517	31.996	3166	13.66	10.52	6.227
10/06/2024	23.7	4.8	14.25	18.9	1.517	33.246	3166	13.66	12.2	6.883
11/06/2024	21.4	6.4	13.9	15	1.517	32.896	3166	13.66	10.01	6.306
12/06/2024	22	5.9	13.95	16.1	1.517	32.946	3166	13.66	10.61	6.453
13/06/2024	22.1	8.5	15.3	13.6	1.517	34.296	3166	13.66	9.78	6.566
14/06/2024	22.6	8.2	15.4	14.4	1.517	34.396	3166	13.66	10.24	6.695
15/06/2024	21.9	8.7	15.3	13.2	1.517	34.296	3166	13.66	9.57	6.516
16/06/2024	19	9.6	14.3	9.4	1.517	33.296	3166	13.66	7.19	5.749
17/06/2024	20.5	9.8	15.15	10.7	1.517	34.146	3166	13.66	8.19	6.163
18/06/2024	18.7	11.1	14.9	7.6	1.517	33.896	3166	13.66	6.45	5.709
19/06/2024	11.1	8.5	9.8	2.6	1.517	28.796	3166	13.66	1.92	3.735
20/06/2024	14.1	8.3	11.2	5.8	1.517	30.196	3166	13.66	4.13	4.459
21/06/2024	18.1	9.1	13.6	9	1.517	32.596	3166	13.66	6.71	5.497
22/06/2024	23.5	6.9	15.2	16.6	1.517	34.196	3166	13.66	11.33	6.902
23/06/2024	21.5	6.8	14.15	14.7	1.517	33.146	3166	13.66	9.94	6.345
24/06/2024	22.3	8.2	15.25	14.1	1.517	34.246	3166	13.66	10.03	6.611
25/06/2024	22.6	8.7	15.65	13.9	1.517	34.646	3166	13.66	10.07	6.713
26/06/2024	21.2	9.5	15.35	11.7	1.517	34.346	3166	13.66	8.79	6.348

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
27/06/2024	20.4	9.1	14.75	11.3	1.517	33.746	3166	13.66	8.36	6.115
28/06/2024	21.5	7.5	14.5	14	1.517	33.496	3166	13.66	9.7	6.367
29/06/2024	19.9	9.2	14.55	10.7	1.517	33.546	3166	13.66	7.97	5.982
30/06/2024	18.7	10.6	14.65	8.1	1.517	33.646	3166	13.66	6.63	5.695

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de junio una temperatura promedio mensual de 14.285 °C y una evaporación promedio de 6.185 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 13

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de julio del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/07/2024	20.5	9.9	15.2	10.6	1.517	34.196	3166	13.66	8.15	6.166
02/07/2024	22.3	8.3	15.3	14	1.517	34.296	3166	13.66	9.99	6.615
03/07/2024	21.2	7	14.1	14.2	1.517	33.096	3166	13.66	9.66	6.27
04/07/2024	21.6	8.4	15	13.2	1.517	33.996	3166	13.66	9.46	6.423
05/07/2024	17.2	7.7	12.45	9.5	1.517	31.446	3166	13.66	6.55	5.23
06/07/2024	21	8.3	14.65	12.7	1.517	33.646	3166	13.66	9.06	6.255
07/07/2024	20.7	9.2	14.95	11.5	1.517	33.946	3166	13.66	8.54	6.2
08/07/2024	20.5	10.6	15.55	9.9	1.517	34.546	3166	13.66	7.91	6.188
09/07/2024	20.8	8	14.4	12.8	1.517	33.396	3166	13.66	9.02	6.191

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
10/07/2024	19.8	7.2	13.5	12.6	1.517	32.496	3166	13.66	8.59	5.899
11/07/2024	20.6	5.9	13.25	14.7	1.517	32.246	3166	13.66	9.61	6.075
12/07/2024	19.5	7	13.25	12.5	1.517	32.246	3166	13.66	8.44	5.813
13/07/2024	20.7	7.9	14.3	12.8	1.517	33.296	3166	13.66	8.99	6.161
14/07/2024	21.8	6.4	14.1	15.4	1.517	33.096	3166	13.66	10.29	6.414
15/07/2024	19.6	8.7	14.15	10.9	1.517	33.146	3166	13.66	7.93	5.886
16/07/2024	20.9	7.8	14.35	13.1	1.517	33.346	3166	13.66	9.17	6.212
17/07/2024	21.5	3.9	12.7	17.6	1.517	31.696	3166	13.66	10.94	6.257
18/07/2024	21.5	4.3	12.9	17.2	1.517	31.896	3166	13.66	10.8	6.269
19/07/2024	21.8	4.3	13.05	17.5	1.517	32.046	3166	13.66	11.02	6.349
20/07/2024	19.7	4.2	11.95	15.5	1.517	30.946	3166	13.66	9.55	5.792
21/07/2024	19.9	4.3	12.1	15.6	1.517	31.096	3166	13.66	9.66	5.847
22/07/2024	18.6	5.4	12	13.2	1.517	30.996	3166	13.66	8.35	5.537
23/07/2024	20.9	6.2	13.55	14.7	1.517	32.546	3166	13.66	9.72	6.165
24/07/2024	22.1	6.9	14.5	15.2	1.517	33.496	3166	13.66	10.33	6.513
25/07/2024	21.4	6.2	13.8	15.2	1.517	32.796	3166	13.66	10.07	6.299
26/07/2024	22.9	6.9	14.9	16	1.517	33.896	3166	13.66	10.91	6.734
27/07/2024	22.5	9.6	16.05	12.9	1.517	35.046	3166	13.66	9.69	6.716
28/07/2024	20.6	8.9	14.75	11.7	1.517	33.746	3166	13.66	8.57	6.164
29/07/2024	21.5	10.3	15.9	11.2	1.517	34.896	3166	13.66	8.73	6.457
30/07/2024	17.7	10.5	14.1	7.2	1.517	33.096	3166	13.66	5.95	5.425
31/07/2024	20.3	9.5	14.9	10.8	1.517	33.896	3166	13.66	8.15	6.099

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de julio una temperatura promedio mensual de 14.053 °C y una evaporación promedio de 6.149 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 14

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de agosto del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/08/2024	20.6	7.8	14.2	12.8	1.517	33.196	3166	13.66	8.95	6.131
02/08/2024	23.3	9.8	16.55	13.5	1.517	35.546	3166	13.66	10.19	6.951
03/08/2024	21	8	14.5	13	1.517	33.496	3166	13.66	9.17	6.246
04/08/2024	20.7	7.6	14.15	13.1	1.517	33.146	3166	13.66	9.09	6.152
05/08/2024	18.5	9.8	14.15	8.7	1.517	33.146	3166	13.66	6.76	5.621
06/08/2024	21.6	10	15.8	11.6	1.517	34.796	3166	13.66	8.91	6.475
07/08/2024	21.4	8.2	14.8	13.2	1.517	33.796	3166	13.66	9.38	6.362
08/08/2024	20.2	7.2	13.7	13	1.517	32.696	3166	13.66	8.87	6.006
09/08/2024	19.4	9.5	14.45	9.9	1.517	33.446	3166	13.66	7.51	5.855
10/08/2024	22.3	8.8	15.55	13.5	1.517	34.546	3166	13.66	9.82	6.632
11/08/2024	21.7	7.3	14.5	14.4	1.517	33.496	3166	13.66	9.91	6.416
12/08/2024	18.2	8.4	13.3	9.8	1.517	32.296	3166	13.66	7.03	5.506
13/08/2024	20.9	8.6	14.75	12.3	1.517	33.746	3166	13.66	8.89	6.237
14/08/2024	21.7	7.9	14.8	13.8	1.517	33.796	3166	13.66	9.7	6.435
15/08/2024	21.7	6.6	14.15	15.1	1.517	33.146	3166	13.66	10.15	6.393
16/08/2024	22	6.5	14.25	15.5	1.517	33.246	3166	13.66	10.4	6.472

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
17/08/2024	20.8	7.1	13.95	13.7	1.517	32.946	3166	13.66	9.34	6.164
18/08/2024	21.2	6.4	13.8	14.8	1.517	32.796	3166	13.66	9.86	6.251
19/08/2024	21.9	7.9	14.9	14	1.517	33.896	3166	13.66	9.85	6.49
20/08/2024	21.7	8.5	15.1	13.2	1.517	34.096	3166	13.66	9.5	6.454
21/08/2024	24	9.2	16.6	14.8	1.517	35.596	3166	13.66	10.9	7.131
22/08/2024	24.3	10.6	17.45	13.7	1.517	36.446	3166	13.66	10.63	7.273
23/08/2024	23.4	10.3	16.85	13.1	1.517	35.846	3166	13.66	10.09	6.999
24/08/2024	21.4	11.9	16.65	9.5	1.517	35.646	3166	13.66	8.11	6.482
25/08/2024	22.8	12.2	17.5	10.6	1.517	36.496	3166	13.66	9.01	6.896
26/08/2024	21.2	11.5	16.35	9.7	1.517	35.346	3166	13.66	8.1	6.412
27/08/2024	21.5	11.1	16.3	10.4	1.517	35.296	3166	13.66	8.46	6.484
28/08/2024	19.9	10.9	15.4	9	1.517	34.396	3166	13.66	7.38	6.031
29/08/2024	21	7.5	14.25	13.5	1.517	33.246	3166	13.66	9.34	6.23
30/08/2024	20.1	9.7	14.9	10.4	1.517	33.896	3166	13.66	7.94	6.05
31/08/2024	22.1	9.9	16	12.2	1.517	34.996	3166	13.66	9.3	6.613

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de agosto una temperatura promedio mensual de 15.148 °C y una evaporación promedio de 6.38 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 15

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de setiembre del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/09/2024	19.1	8.5	13.8	10.6	1.517	32.796	3166	13.66	7.64	5.747
02/09/2024	20.3	8.9	14.6	11.4	1.517	33.596	3166	13.66	8.36	6.082
03/09/2024	22.5	7.8	15.15	14.7	1.517	34.146	3166	13.66	10.31	6.654
04/09/2024	23.6	9	16.3	14.6	1.517	35.296	3166	13.66	10.68	7.008
05/09/2024	21.5	9.6	15.55	11.9	1.517	34.546	3166	13.66	8.97	6.434
06/09/2024	21.9	10.6	16.25	11.3	1.517	35.246	3166	13.66	8.91	6.58
07/09/2024	21.9	7.8	14.85	14.1	1.517	33.846	3166	13.66	9.88	6.487
08/09/2024	23.6	9.4	16.5	14.2	1.517	35.496	3166	13.66	10.54	7.023
09/09/2024	23.2	9.1	16.15	14.1	1.517	35.146	3166	13.66	10.36	6.897
10/09/2024	24.9	8.8	16.85	16.1	1.517	35.846	3166	13.66	11.68	7.377
11/09/2024	24	8.7	16.35	15.3	1.517	35.346	3166	13.66	11.07	7.111
12/09/2024	22.8	10	16.4	12.8	1.517	35.396	3166	13.66	9.76	6.815
13/09/2024	23	8.7	15.85	14.3	1.517	34.846	3166	13.66	10.36	6.826
14/09/2024	22.6	10	16.3	12.6	1.517	35.296	3166	13.66	9.62	6.758
15/09/2024	22	10.5	16.25	11.5	1.517	35.246	3166	13.66	9.02	6.605
16/09/2024	15.7	11	13.35	4.7	1.517	32.346	3166	13.66	4.34	4.912
17/09/2024	21.6	10.6	16.1	11	1.517	35.096	3166	13.66	8.7	6.495
18/09/2024	23.4	10.7	17.05	12.7	1.517	36.046	3166	13.66	9.95	7.014
19/09/2024	21.5	10.5	16	11	1.517	34.996	3166	13.66	8.66	6.464
20/09/2024	25.9	8.7	17.3	17.2	1.517	36.296	3166	13.66	12.43	7.667

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
21/09/2024	22	12.6	17.3	9.4	1.517	36.296	3166	13.66	8.3	6.678
22/09/2024	23.3	11	17.15	12.3	1.517	36.146	3166	13.66	9.78	6.996
23/09/2024	23.7	9	16.35	14.7	1.517	35.346	3166	13.66	10.75	7.037
24/09/2024	24.1	9.6	16.85	14.5	1.517	35.846	3166	13.66	10.83	7.175
25/09/2024	24.2	12.1	18.15	12.1	1.517	37.146	3166	13.66	10.04	7.305
26/09/2024	20.9	11.9	16.4	9	1.517	35.396	3166	13.66	7.75	6.34
27/09/2024	21.9	10.6	16.25	11.3	1.517	35.246	3166	13.66	8.91	6.58
28/09/2024	19.9	10.4	15.15	9.5	1.517	34.146	3166	13.66	7.55	6.016
29/09/2024	23.7	8.3	16	15.4	1.517	34.996	3166	13.66	10.99	7.01
30/09/2024	20.5	11	15.75	9.5	1.517	34.746	3166	13.66	7.78	6.2

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de setiembre una temperatura promedio mensual de 16.08°C y una evaporación promedio de 6.676 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 16

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de octubre del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/10/2024	23.2	11.7	17.45	11.5	1.517	36.446	3166	13.66	9.46	6.994
02/10/2024	25.3	9.5	17.4	15.8	1.517	36.396	3166	13.66	11.72	7.523
03/10/2024	19.6	10	14.8	9.6	1.517	33.796	3166	13.66	7.48	5.923
04/10/2024	24.3	9.5	16.9	14.8	1.517	35.896	3166	13.66	11.01	7.229
05/10/2024	20.9	11.7	16.3	9.2	1.517	35.296	3166	13.66	7.82	6.334
06/10/2024	23.1	8.4	15.75	14.7	1.517	34.746	3166	13.66	10.53	6.843
07/10/2024	22.9	9.9	16.4	13	1.517	35.396	3166	13.66	9.87	6.84
08/10/2024	24.7	11.5	18.1	13.2	1.517	37.096	3166	13.66	10.61	7.429
09/10/2024	23.5	11	17.25	12.5	1.517	36.246	3166	13.66	9.92	7.055
10/10/2024	24.5	9.2	16.85	15.3	1.517	35.846	3166	13.66	11.26	7.276
11/10/2024	23.7	9.7	16.7	14	1.517	35.696	3166	13.66	10.51	7.063
12/10/2024	24.4	11.1	17.75	13.3	1.517	36.746	3166	13.66	10.53	7.323
13/10/2024	23.7	8.4	16.05	15.3	1.517	35.046	3166	13.66	10.96	7.014
14/10/2024	17.7	11.2	14.45	6.5	1.517	33.446	3166	13.66	5.7	5.442
15/10/2024	22.1	10.7	16.4	11.4	1.517	35.396	3166	13.66	9.02	6.64
16/10/2024	21.7	10.2	15.95	11.5	1.517	34.946	3166	13.66	8.91	6.51
17/10/2024	24.9	9.5	17.2	15.4	1.517	36.196	3166	13.66	11.44	7.405
18/10/2024	25	10.5	17.75	14.5	1.517	36.746	3166	13.66	11.17	7.476
19/10/2024	26.9	11.6	19.25	15.3	1.517	38.246	3166	13.66	12.14	8.103
20/10/2024	24.3	10.4	17.35	13.9	1.517	36.346	3166	13.66	10.7	7.265

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
21/10/2024	22.8	11.2	17	11.6	1.517	35.996	3166	13.66	9.35	6.859
22/10/2024	23.1	12.3	17.7	10.8	1.517	36.696	3166	13.66	9.19	6.987
23/10/2024	23.5	8.7	16.1	14.8	1.517	35.096	3166	13.66	10.71	6.968
24/10/2024	24.5	11.8	18.15	12.7	1.517	37.146	3166	13.66	10.36	7.382
25/10/2024	22.4	10.9	16.65	11.5	1.517	35.646	3166	13.66	9.17	6.733
26/10/2024	21.4	9.4	15.4	12	1.517	34.396	3166	13.66	8.97	6.4
27/10/2024	24.8	8.3	16.55	16.5	1.517	35.546	3166	13.66	11.78	7.327
28/10/2024	22.7	12.5	17.6	10.2	1.517	36.596	3166	13.66	8.83	6.878
29/10/2024	19.4	11.8	15.6	7.6	1.517	34.596	3166	13.66	6.71	5.919
30/10/2024	23.2	10.8	17	12.4	1.517	35.996	3166	13.66	9.77	6.96
31/10/2024	26	10	18	16	1.517	36.996	3166	13.66	12.05	7.754

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de octubre una temperatura promedio mensual de 16.83 °C y una evaporación promedio de 6.963 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 17

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de noviembre del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/11/2024	26.7	10.5	18.6	16.2	1.517	37.596	3166	13.66	12.38	7.989
02/11/2024	25.8	11.9	18.85	13.9	1.517	37.846	3166	13.66	11.25	7.779
03/11/2024	25.4	11.9	18.65	13.5	1.517	37.646	3166	13.66	10.97	7.657
04/11/2024	25.2	10.9	18.05	14.3	1.517	37.046	3166	13.66	11.17	7.553
05/11/2024	24.2	9.7	16.95	14.5	1.517	35.946	3166	13.66	10.87	7.208
06/11/2024	24	10.9	17.45	13.1	1.517	36.446	3166	13.66	10.31	7.197
07/11/2024	23.8	13	18.4	10.8	1.517	37.396	3166	13.66	9.44	7.222
08/11/2024	24.9	11.9	18.4	13	1.517	37.396	3166	13.66	10.61	7.506
09/11/2024	20.5	11.4	15.95	9.1	1.517	34.946	3166	13.66	7.64	6.212
10/11/2024	24.6	12.1	18.35	12.5	1.517	37.346	3166	13.66	10.33	7.424
11/11/2024	24.5	11	17.75	13.5	1.517	36.746	3166	13.66	10.64	7.349
12/11/2024	23	10.8	16.9	12.2	1.517	35.896	3166	13.66	9.63	6.902
13/11/2024	21.1	11.6	16.35	9.5	1.517	35.346	3166	13.66	8	6.387
14/11/2024	25.1	11.5	18.3	13.6	1.517	37.296	3166	13.66	10.89	7.549
15/11/2024	16.5	11.4	13.95	5.1	1.517	32.946	3166	13.66	4.78	5.129
16/11/2024	22.3	10.2	16.25	12.1	1.517	35.246	3166	13.66	9.34	6.68
17/11/2024	20.7	12	16.35	8.7	1.517	35.346	3166	13.66	7.57	6.287
18/11/2024	21.7	10.5	16.1	11.2	1.517	35.096	3166	13.66	8.81	6.52
19/11/2024	23.5	10.5	17	13	1.517	35.996	3166	13.66	10.09	7.036
20/11/2024	23.5	12	17.75	11.5	1.517	36.746	3166	13.66	9.58	7.093

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
21/11/2024	21.6	11.5	16.55	10.1	1.517	35.546	3166	13.66	8.39	6.525
22/11/2024	21.8	11.6	16.7	10.2	1.517	35.696	3166	13.66	8.5	6.586
23/11/2024	18.5	11.2	14.85	7.3	1.517	33.846	3166	13.66	6.28	5.657
24/11/2024	21.2	12	16.6	9.2	1.517	35.596	3166	13.66	7.93	6.428
25/11/2024	19.8	11.6	15.7	8.2	1.517	34.696	3166	13.66	7.07	6.024
26/11/2024	21.3	11	16.15	10.3	1.517	35.146	3166	13.66	8.35	6.424
27/11/2024	22.2	11.6	16.9	10.6	1.517	35.896	3166	13.66	8.78	6.7
28/11/2024	20.3	11.8	16.05	8.5	1.517	35.046	3166	13.66	7.36	6.169
29/11/2024	19.6	10.9	15.25	8.7	1.517	34.246	3166	13.66	7.17	5.948
30/11/2024	21	11.8	16.4	9.2	1.517	35.396	3166	13.66	7.86	6.365

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de noviembre una temperatura promedio mensual de 16.92°C y una evaporación promedio de 6.784 mm/día. Fuente: Propia.

Tabla 18

cálculo de la evaporación correspondiente al mes de diciembre del 2024

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
01/12/2024	22.7	11.8	17.25	10.9	1.517	36.246	3166	13.66	9.07	6.852
02/12/2024	22.5	11.1	16.8	11.4	1.517	35.796	3166	13.66	9.17	6.769
03/12/2024	19.7	9.7	14.7	10	1.517	33.696	3166	13.66	7.65	5.941

AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
04/12/2024	19.3	11	15.15	8.3	1.517	34.146	3166	13.66	6.92	5.869
05/12/2024	21.3	10.2	15.75	11.1	1.517	34.746	3166	13.66	8.62	6.398
06/12/2024	22.4	9.7	16.05	12.7	1.517	35.046	3166	13.66	9.58	6.691
07/12/2024	16.6	11.4	14	5.2	1.517	32.996	3166	13.66	4.85	5.155
08/12/2024	21.1	8.7	14.9	12.4	1.517	33.896	3166	13.66	9	6.295
09/12/2024	16.8	11	13.9	5.8	1.517	32.896	3166	13.66	5.13	5.199
10/12/2024	21	10.6	15.8	10.4	1.517	34.796	3166	13.66	8.27	6.327
11/12/2024	21.1	11.2	16.15	9.9	1.517	35.146	3166	13.66	8.14	6.374
12/12/2024	22.5	9.7	16.1	12.8	1.517	35.096	3166	13.66	9.65	6.719
13/12/2024	20.8	9.3	15.05	11.5	1.517	34.046	3166	13.66	8.58	6.231
14/12/2024	21	10.4	15.7	10.6	1.517	34.696	3166	13.66	8.34	6.32
15/12/2024	21.6	11.1	16.35	10.5	1.517	35.346	3166	13.66	8.53	6.512
16/12/2024	19.1	10.6	14.85	8.5	1.517	33.846	3166	13.66	6.91	5.804
17/12/2024	20.4	8.8	14.6	11.6	1.517	33.596	3166	13.66	8.46	6.106
18/12/2024	19.8	9.9	14.85	9.9	1.517	33.846	3166	13.66	7.65	5.974
19/12/2024	20.9	9.9	15.4	11	1.517	34.396	3166	13.66	8.44	6.277
20/12/2024	22.2	10	16.1	12.2	1.517	35.096	3166	13.66	9.34	6.645
21/12/2024	23	9.9	16.45	13.1	1.517	35.446	3166	13.66	9.94	6.869
22/12/2024	22.1	10.2	16.15	11.9	1.517	35.146	3166	13.66	9.2	6.623
23/12/2024	19.6	9.9	14.75	9.7	1.517	33.746	3166	13.66	7.51	5.92
24/12/2024	23.1	10.2	16.65	12.9	1.517	35.646	3166	13.66	9.91	6.909
25/12/2024	22.1	12.3	17.2	9.8	1.517	36.196	3166	13.66	8.47	6.696
26/12/2024	21.8	10.8	16.3	11	1.517	35.296	3166	13.66	8.77	6.559
27/12/2024	21.5	11.4	16.45	10.1	1.517	35.446	3166	13.66	8.35	6.494

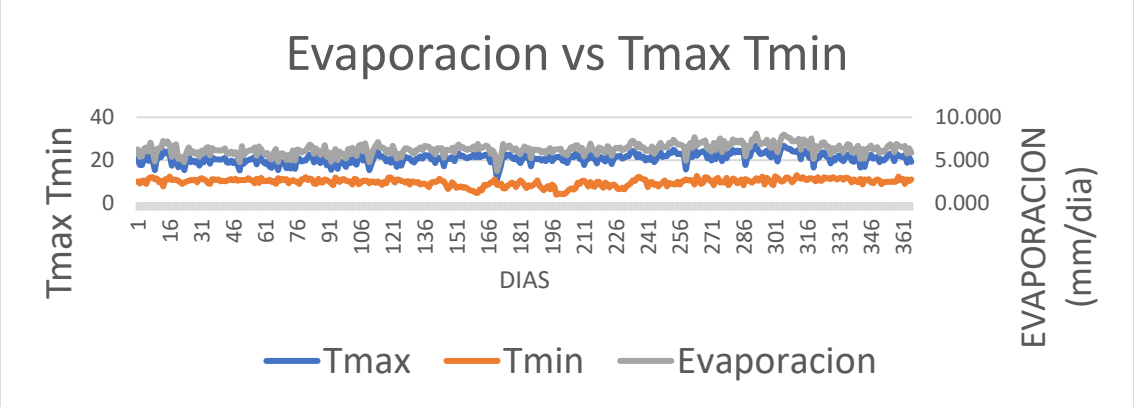
AÑO / MES / DÍA	TEMPERATURA (°C)		Temperatura media (T)	Rango	Rann	Tm	h	A	T-Td	E0
	MAX	MIN		R						(mm/dia)
28/12/2024	22.4	9	15.7	13.4	1.517	34.696	3166	13.66	9.82	6.667
29/12/2024	18.8	11.1	14.95	7.7	1.517	33.946	3166	13.66	6.53	5.736
30/12/2024	21.2	10.3	15.75	10.9	1.517	34.746	3166	13.66	8.52	6.373
31/12/2024	19.2	11	15.1	8.2	1.517	34.096	3166	13.66	6.85	5.842

Nota. De la tabla anterior se determina para el mes de noviembre una temperatura promedio mensual de 15.64 °C y una evaporación promedio de 6.295 mm/día. Fuente: Propia.

Con base en las tablas utilizadas para el cálculo de evaporación a lo largo de los 365 días del año, se determinó que el mes con la mayor temperatura promedio es noviembre, con 16.91°C, mientras que el mes con la menor temperatura es julio, con 14.50°C. En cuanto a la evaporación, octubre también registra el valor más alto, con 6.96 mm/día, mientras que el valor más bajo se presenta en marzo, con 5.83 mm/día. Los resultados de evaporación obtenidos se representan gráficamente para una mejor visualización de las variaciones mensuales.

Figura 26

evaporación vs Temperatura



Nota. Se muestra la variación de la temperatura respecto a la evaporación. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.5 Análisis de variación de caudales considerando la infiltración y evaporación. Se estimaron las pérdidas de caudal por infiltración y evaporación para el canal, basándose en cálculos que consideran las temperaturas diarias de los 365 días del año 2024 y 2025, utilizando la fórmula de Penman.

Los resultados del cálculo de la evaporación, presentados en las tablas anteriores, están en mm/día; por lo tanto, se procederá a convertirlos a caudal (m3/s) utilizando la siguiente fórmula para el cálculo del caudal de evaporación.

EC- 17 *Caudal por evaporación*

$$Q = T \times L \times E(\frac{m3}{s}) \quad (17)$$

Donde:

Q= Caudal por evaporación (m³/s)

T= Espejo de agua (m)

L= Lngitud de canal (m)

E= Velocidad del escurrimiento (m/s)

A continuación, se presenta los datos de caudales de ingreso, caudal de perdida por infiltración, evaporación y caudal final, conforme se a los cálculos realizados anteriormente.

Tabla 19 *perdida de caudales en canal revestido*

N°	Fecha	Caudal (lit/seg)			
		km 00+200	infiltración	evaporación	km 00+420
1	05/05/2025	42.1549	1.7388	0.0054	40.4107
2	06/05/2025	32.0683	0.633	0.0062	31.4291
3	07/05/2025	38.6912	1.3509	0.0066	37.3337
4	08/05/2025	45.7161	1.7861	0.0065	43.9235
5	09/05/2025	36.9969	1.3308	0.0064	35.6597

Nota. Para determinar el caudal por evaporación, se multiplicaron los valores diarios de evaporación previamente calculados para cada día en que se realizó el aforo. Estos cálculos se efectuaron considerando las dimensiones del tramo en estudio, que tiene una longitud de 220 metros, y el ancho del espejo de agua del canal, que es de 0.40 metros. Finalmente, los resultados obtenidos fueron convertidos a litros por segundo (litros/segundo). El caudal de infiltración varió entre 0.6330 L/s y 1.7861 L/s, en función del estado físico del canal revestido. Durante el trabajo de campo se evidenció la falta de mantenimiento, lo cual genera estancamientos y filtraciones a través de juntas y otras

deficiencias estructurales. El caudal de infiltración se obtuvo restando el caudal de salida al caudal de entrada, y descontando posteriormente el caudal de evaporación para aislar el valor real de infiltración. Fuente: Elaboración propia

Tabla 20

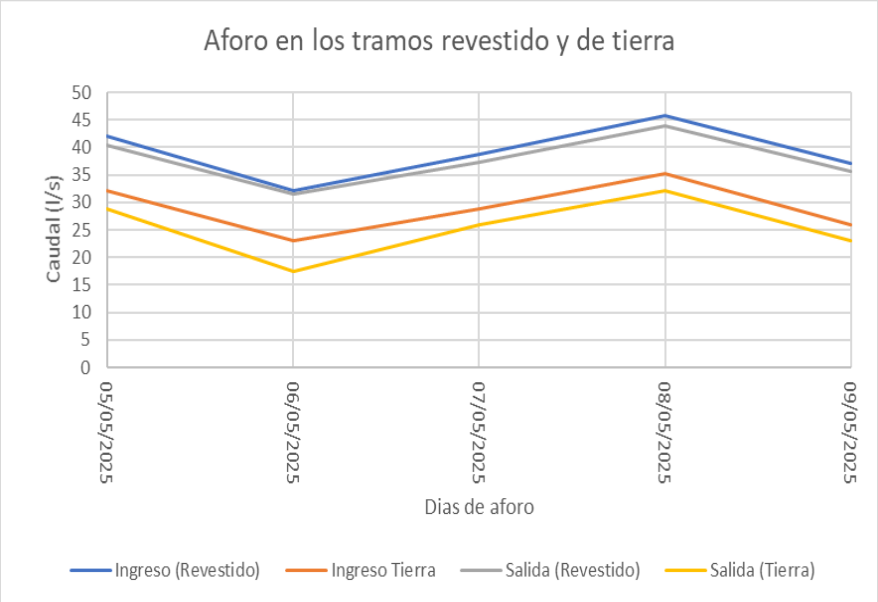
perdida de caudales en canal de tierra

N°	Fecha	Caudal (lit/seg)			
		km 01+000	infiltración	evaporación	km 01+200
1	**05/05/2025**	32.0683	3.1479	0.0049	28.9155
2	**06/05/2025**	22.9462	5.4848	0.0056	17.4558
3	**07/05/2025**	28.9155	3.0361	0.006	25.8734
4	**08/05/2025**	35.328	3.2538	0.0059	32.0683
5	**09/05/2025**	25.8734	2.9214	0.0058	22.9462

Nota. Para determinar el caudal por evaporación, se multiplicaron los valores diarios de evaporación previamente calculados para cada día en que se realizó el aforo. Estos cálculos se efectuaron considerando las dimensiones del tramo en estudio, que tiene una longitud de 200 metros, y el ancho del espejo de agua del canal, que es de 0.45 metros en promedio. Finalmente, los resultados obtenidos fueron convertidos a litros por segundo (litros/segundo). El caudal de infiltración presentó valores entre 2.9214 L/s y 5.4848 L/s, determinados en función del estado físico del canal de tierra. Durante el trabajo de campo se constató la falta de mantenimiento, evidenciada por estancamientos de agua y filtraciones a través de los bordes y otras deficiencias estructurales. El caudal de infiltración fue calculado a partir de la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida, descontando posteriormente el caudal por evaporación, con el fin de obtener una estimación precisa de las pérdidas por infiltración. Fuente: Elaboración propia.

Figura 27

Aforo en los tramos revestido y de tierra



Nota. En la figura se muestra el caudal vs los días de aforo. Dato: Elaboración propia.

Tabla 21 *Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra*

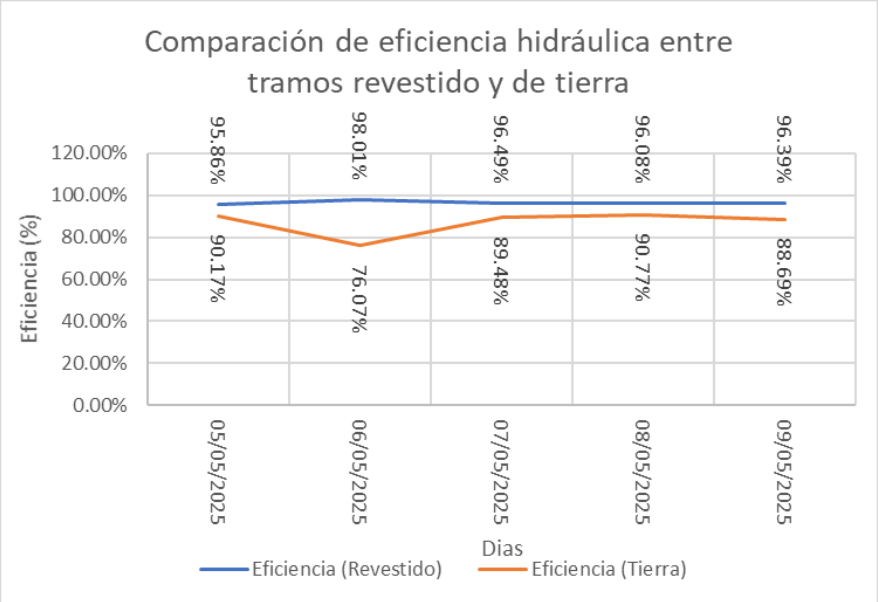
Fecha	Tipo de Canal	Caudal de Ingreso (L/s)	Caudal de Salida (L/s)	Pérdida por Infiltración (L/s)	Eficiencia Hidráulica (%)
05/05/2025	Revestido	42.15	40.41	1.74	95.86
	De tierra	32.07	28.92	3.15	90.17
06/05/2025	Revestido	32.07	31.43	0.64	98.01
	De tierra	22.95	17.46	5.49	76.07
07/05/2025	Revestido	38.69	37.33	1.36	96.49
	De tierra	28.92	25.87	3.04	89.48
08/05/2025	Revestido	45.72	43.92	1.79	96.08
	De tierra	35.33	32.07	3.26	90.77
09/05/2025	Revestido	37	35.66	1.34	96.39
	De tierra	25.87	22.95	2.93	88.69

Nota. Tabla de tipo de canal, caudal ingreso salida, pérdida por infiltración y eficiencia.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28

Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra



Nota. En la figura se muestra el caudal vs los días de aforo. Dato: Elaboración propia.

5.2.2 Resultados por objetivos específicos

Analizar el impacto del revestimiento y la rehabilitación de los canales de riego en la reducción de pérdidas hídricas por infiltración y evaporación. La presente sección tiene como finalidad analizar el impacto que tiene el revestimiento de canales sobre la eficiencia en la conducción del agua, comparando los niveles de pérdida hídrica por infiltración y evaporación entre un tramo revestido con concreto y un tramo de tierra del canal de riego evaluado en Atumpata. Para ello, se tomó como base los datos obtenidos durante los aforos realizados en campo, así como los cálculos de evaporación diaria aplicando la fórmula de Penman.

Los resultados obtenidos muestran una diferencia significativa en las pérdidas hídricas entre ambos tramos. En el canal revestido, las pérdidas totales fluctúan entre 1.74 L/s y 1.79 L/s, mientras que, en el canal de tierra, estas oscilan entre 2.92 L/s y 5.48 L/s. Este contraste evidencia que el revestimiento con concreto reduce considerablemente las

pérdidas por infiltración, siendo este el principal mecanismo de pérdida en ambos tipos de canal.

Tabla 22

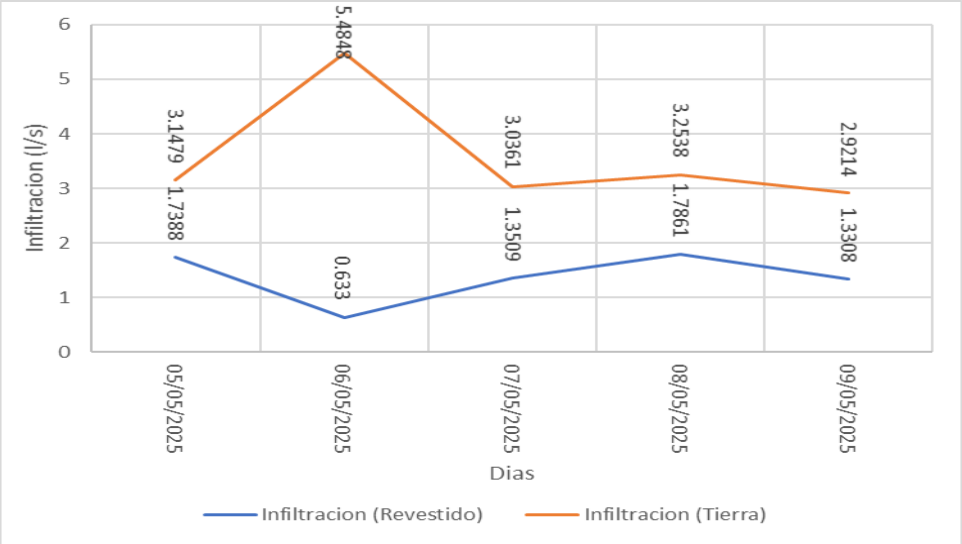
Comparación de pérdidas de caudal en ambos canales

Tipo de canal	Prom. caudal ingreso (L/s)	Prom. infiltración (L/s)	Prom. evaporación (L/s)	Prom. caudal salida (L/s)	% pérdida por infiltración
Revestido	39.92	1.37	0.0062	38.54	3.50%
De tierra	29.03	3.57	0.0056	25.46	13.20%

Nota. Tabla de tipo de canal, caudal ingreso salida, pérdida por infiltración y eficiencia. Fuente: Elaboración propia.

Figura 29

Perdidas por infiltracion en ambos tipos de canales



Nota. En la figura se muestra la infiltración en canal revestido vs tierra. Fuente: Elaboración propia.

En términos porcentuales, el promedio de pérdida por infiltración en el canal de tierra representó aproximadamente un 13.2 % del caudal de ingreso, mientras que en el canal revestido esta pérdida se redujo a un promedio de 3.5 %, considerando que las

condiciones físicas del canal revestido presentaban algunas deficiencias estructurales como juntas deterioradas y sedimentos acumulados

Respecto a la evaporación, se encontró que las pérdidas fueron mínimas en ambos casos. Estas fluctuaron entre 0.0049 L/s y 0.0066 L/s, valores que, aunque técnicamente precisos, representan un impacto marginal en el balance hídrico total del canal. Esto sugiere que la evaporación no constituye un factor crítico en la eficiencia del canal, al menos bajo las condiciones climáticas y topográficas del estudio

Además, el estado de mantenimiento del canal tuvo un papel clave en los resultados. En el tramo revestido, se observó la acumulación de sedimentos y materiales orgánicos, lo que ocasiona obstrucciones parciales. A pesar de estar revestido, estas condiciones disminuyen la eficiencia hidráulica. Por ello, el revestimiento por sí solo no garantiza la reducción óptima de pérdidas si no va acompañado de un plan de mantenimiento periódico

En contraste, el canal de tierra mostró una mayor variabilidad en las pendientes, filtraciones notorias en los bordes, y ausencia de estructuras de control adecuadas, lo que favorece la infiltración y afecta negativamente la conducción del agua. Estas pérdidas no solo implican un menor volumen de agua disponible para riego, sino que también afectan la distribución equitativa del recurso entre los usuarios aguas abajo.

En resumen, se concluye que el revestimiento de los canales de riego tiene un impacto positivo y cuantificable en la reducción de pérdidas hídricas, especialmente por infiltración. No obstante, la rehabilitación debe ser integral, considerando también el estado de las estructuras, las juntas, el diseño de pendientes y la gestión del mantenimiento para garantizar una mejora sostenible en la eficiencia del sistema de riego.

Este análisis concuerda con investigaciones previas que afirman que los revestimientos en canales de riego pueden reducir entre un 70 % y 90 % de pérdidas por infiltración, especialmente en suelos con alta porosidad o bajo nivel freático (Martínez y Paredes, 2019; FAO, 2020). Asimismo, el estudio de Calderón et al. (2021) en la cuenca

del río Chili destaca que los canales sin revestimiento presentan pérdidas de hasta 5.0 L/s en solo 200 metros lineales, cifras coherentes con lo hallado en el presente trabajo.

Se concluye que el revestimiento y rehabilitación de los canales de riego tiene un impacto directo, medible y positivo sobre la reducción de pérdidas hídricas, particularmente por infiltración. Aunque el revestimiento no elimina totalmente las pérdidas, las reduce significativamente y mejora la eficiencia hidráulica del sistema. La evaporación, si bien está presente, tiene un efecto menor. Por tanto, se recomienda extender la rehabilitación a otros tramos críticos y reforzar el componente de mantenimiento preventivo para lograr sostenibilidad en el tiempo.

Comparar la eficiencia hidráulica en la conducción del agua entre tramos de canal revestido y no revestido, considerando las pérdidas por variación de caudal. Con el propósito de evaluar la eficiencia hidráulica de los canales de riego en la conducción del agua, se compararon dos tramos del canal Huallhuayoc: uno con revestimiento de concreto y otro sin revestimiento (canal de tierra). Para ello, se realizaron mediciones diarias del caudal de entrada y salida en ambos tramos durante cinco días consecutivos, bajo condiciones hidráulicas controladas.

La eficiencia hidráulica se calculó con base en la relación entre el caudal de salida y el de entrada, y las pérdidas se determinaron como la diferencia entre ambos. A continuación, se presentan los datos diarios obtenidos.

Tabla 23

Aforo diario y eficiencia hidráulica de los tramos de canal revestido y de tierra

Fecha	Caudal (litros/segundo)				Canal Revestido		Canal Tierra	
	Canal Revestido		Canal Revestido					
	Ingreso	Salida	Ingreso	Salida	Perdida	Eficiencia (%)	Perdida	Eficiencia (%)
05/05/2025	42.1549	40.4107	32.0683	28.9155	1.7442	95.8624	3.1528	90.1685
06/05/2025	32.0683	31.4291	22.9462	17.4558	0.6392	98.0068	5.4904	76.0727
07/05/2025	38.6912	37.3337	28.9155	25.8734	1.3575	96.4915	3.0421	89.4793
08/05/2025	45.7161	43.9235	35.328	32.0683	1.7926	96.0788	3.2597	90.773
09/05/2025	36.9969	35.6597	25.8734	22.9462	1.3372	96.3856	2.9272	88.6865

Nota. La tabla presenta los resultados del aforo realizado durante cinco días consecutivos en dos tramos del canal Huallhuayoc: uno revestido con concreto y otro sin revestimiento (canal de tierra). Se midieron los caudales de ingreso y salida en cada tramo, permitiendo calcular la pérdida de agua y la eficiencia hidráulica en la conducción. En el canal revestido, la eficiencia promedio fue de aproximadamente 96.57 %, con pérdidas que fluctuaron entre 0.63 L/s y 1.79 L/s, lo cual indica una buena capacidad de conducción con escasa pérdida, atribuible principalmente a filtraciones menores y deficiencias estructurales como juntas deterioradas. La estabilidad de las pendientes y la uniformidad de la sección transversal contribuyen a minimizar las pérdidas. En contraste, el canal de tierra presentó una eficiencia hidráulica promedio de 87.04 %, evidenciando pérdidas más significativas (entre 2.92 L/s y 5.49 L/s). Esto se debe a procesos intensos de infiltración, presencia de vegetación, irregularidades en la geometría del canal y ausencia de obras de control hidráulico. Estos factores afectan la conducción eficiente del recurso hídrico, comprometiendo el volumen disponible para los usuarios aguas abajo. Estos resultados refuerzan la importancia del revestimiento en la infraestructura de riego como estrategia para reducir pérdidas y optimizar la eficiencia del sistema hidráulico. No obstante, se resalta que incluso los canales revestidos requieren mantenimiento regular para mantener su funcionalidad óptima.Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se calcularon los valores promedio para cada tramo a fin de establecer una comparación global de eficiencia. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 24

Resumen comparativo de eficiencia hidráulica entre canal revestido y de tierra

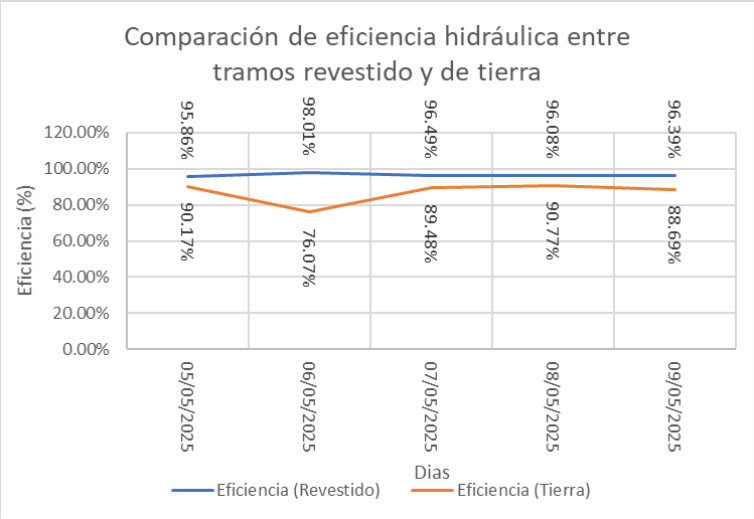
Canal	Promedio Perdida (l/s)	Promedio Eficiencia (%)
Revestido	1.37	96.57

Tierra	3.57	87.04

Nota. Se observa que el canal revestido presenta una pérdida promedio significativamente menor (1.37 L/s) y una eficiencia superior al 96.57 %, en contraste con el canal de tierra que alcanza solo el 87 % de eficiencia hidráulica. Fuente: Elaboración propia.

Figura 30

Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos revestido y de tierra



Nota. Se observa en la figura la eficiencia Revestido vs tierra. Fuente: Elaboración propia.

Los datos muestran que el canal revestido conduce el agua con una eficiencia hidráulica promedio de 96.57 %, mientras que el canal de tierra alcanza una eficiencia de 87.04 %. Esto representa una diferencia del 9.5 % en eficiencia relativa y una pérdida adicional de 2.2 L/s en el canal sin revestimiento. Dichas pérdidas son atribuibles a la infiltración, la geometría irregular y la ausencia de mantenimiento adecuado en el canal de tierra.

Evaluar la efectividad de las estructuras de control (compuertas y medidores de caudal) en la mejora de la distribución equitativa y el uso racional del recurso hídrico

En esta sección se evalúa la influencia de las estructuras de control hidráulico en el desempeño del canal Huallhuayoc, específicamente en relación con la distribución equitativa del recurso hídrico y el uso racional del mismo. La comparación se realiza entre dos tramos bien definidos: el **tramo revestido**, que se extiende desde la progresiva 0+000 hasta 0+800, y el **tramo no revestido**, que abarca desde la progresiva 0+800 hasta la 1+871.

Durante el levantamiento de campo, se identificaron estructuras clave en el tramo revestido. En la progresiva 0+000 se ubica la bocatoma principal, la cual se encuentra en buen estado operativo y libre de obstrucciones. Inmediatamente después, en la progresiva 0+020, se localiza un desarenador que cumple la función de retener sedimentos gruesos, protegiendo el canal aguas abajo. Asimismo, en la progresiva 0+030 se constató la presencia de un medidor de caudal tipo RBC (Rectangular Broad-Crested), cuya operación permite monitorear el volumen de agua ingresado al sistema. En cuanto a estructuras complementarias, se observaron dos canoas en las progresivas 1+020 y 1+500, las cuales garantizan la continuidad hidráulica del canal al permitir el cruce del flujo sobre caminos y quebradas.

En lo referente a las tomas laterales, se registraron un total de 15 a lo largo del canal, clasificadas en dos tipos: **T1** (8 unidades) y **T2** (7 unidades). Las tomas T1 se localizan en las progresivas 0+125, 0+370, 0+590, 0+820, 1+060, 1+310, 1+555 y 1+790; mientras que las tomas T2 se encuentran en las progresivas 0+210, 0+470, 0+710, 0+940, 1+190, 1+440 y 1+675. Del total, ocho tomas están ubicadas dentro del tramo revestido (hasta 0+800), de las cuales seis cuentan con compuertas metálicas funcionales, permitiendo una regulación parcial del caudal entregado. En el tramo no revestido, que comprende siete tomas, ninguna cuenta con compuerta, lo que impide la distribución controlada del recurso.

El análisis de eficiencia hidráulica y regulación se muestra en el siguiente cuadro, en el cual se observan indicadores técnicos de ambos tramos, obtenidos a partir de aforos mediante vertederos durante cinco días consecutivos. En el tramo revestido, se registró una eficiencia hidráulica promedio de 96.35 %, mientras que en el tramo no revestido esta fue de 86.86 %. Asimismo, las pérdidas por infiltración fueron notablemente mayores en el tramo de tierra (3.85 L/s) respecto al tramo revestido (1.47 L/s), siendo prácticamente iguales las pérdidas por evaporación (0.006 L/s).

Tabla 25

Indicadores hidráulicos comparativos entre tramos con y sin estructuras de control

Indicador	Tramo Revestido (0+000 – 0+800)	Tramo No Revestido (0+800 – 1+871)
Caudal promedio de ingreso (L/s)	40.25	29.3
Caudal promedio de salida (L/s)	38.75	25.45
Pérdida por infiltración (L/s)	1.47	3.85
Evaporación (L/s)	0.006	0.006
Eficiencia hidráulica (%)	96.35	86.86
Tomas con compuerta / Total tomas	6/8 (75 %)	0/7 (0 %)
Índice de Regulación Hidráulica (%)	75	0
Índice de Equidad de Distribución (%)	66.5	43

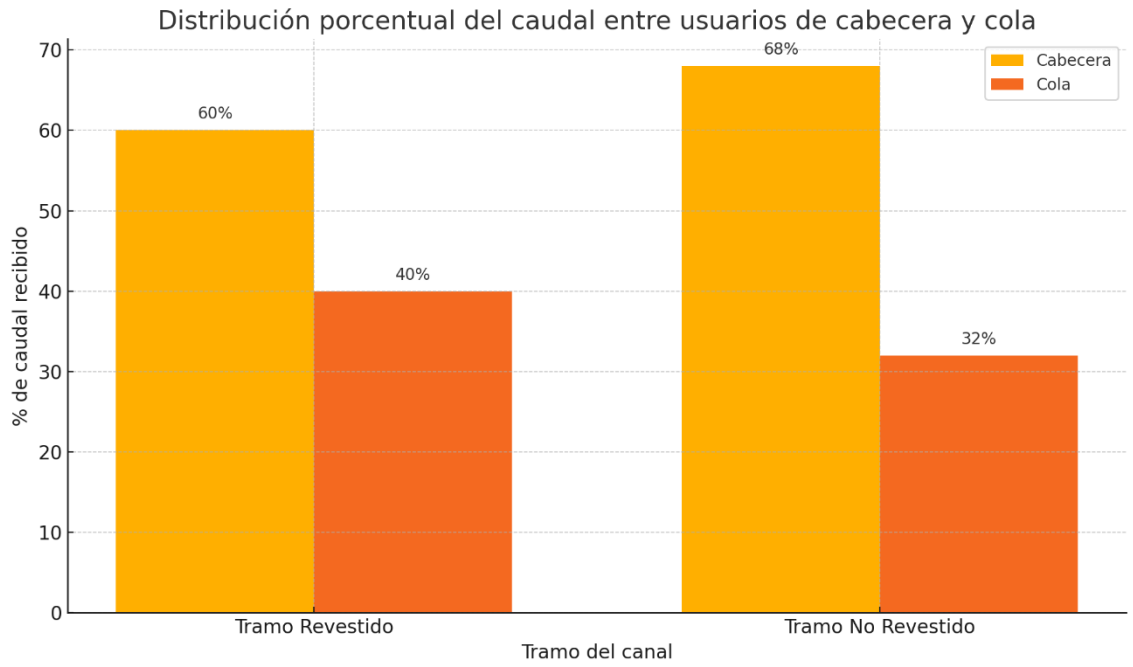
Nota. Elaboración propia

El comportamiento operativo también fue analizado mediante observación directa y entrevistas a 18 usuarios. En el tramo revestido, el 85 % de los agricultores calificó la distribución del agua como “justa” o “regular”, mientras que en el tramo no revestido el 72 % reportó que “no recibe el volumen suficiente” durante épocas de alta demanda. Esta situación responde principalmente a la ausencia de compuertas y al uso ineficiente del agua en los tramos de cabecera, lo que genera sobreconsumo y reduce la disponibilidad para los usuarios aguas abajo.

En la **Figura 12**, se presenta la distribución porcentual del caudal entregado por sector (cabecera vs. cola), en ambos tramos del canal. Se puede observar que, mientras en el tramo revestido la distribución se aproxima a un reparto equilibrado (60/40), en el tramo no revestido el desequilibrio es más evidente (68/32), afectando principalmente a los agricultores del tramo final.

Figura 31

Distribución porcentual del caudal entre usuarios de cabecera y cola



Nota. Elaboración propia.

Los datos muestran que las estructuras de control, cuando están operativas, tienen un impacto directo en la eficiencia y equidad del sistema de riego. En el tramo revestido, la presencia de compuertas permite ajustar el volumen entregado a cada parcela de acuerdo con los turnos establecidos. Asimismo, el medidor RBC en la progresiva 0+030 facilita el monitoreo técnico del caudal derivado desde la bocatoma, permitiendo identificar variaciones o pérdidas con mayor precisión. No obstante, se observó que las compuertas

requieren mantenimiento y que no todas las tomas en este tramo están completamente operativas, lo que puede limitar parcialmente sus beneficios.

En contraste, el tramo no revestido no dispone de ninguna estructura de regulación, lo que genera una distribución arbitraria del recurso. La ausencia de compuertas y medición impide realizar ajustes técnicos o establecer turnos eficaces, contribuyendo a conflictos entre usuarios, sobre todo en temporadas de escasez.

En conclusión, se afirma que las estructuras de control hidráulico —particularmente compuertas, medidores de caudal y una bocatoma funcional— son fundamentales para mejorar la eficiencia del sistema de riego y promover una distribución equitativa del agua. Su presencia permite reducir las pérdidas por infiltración, realizar monitoreo efectivo y evitar el uso excesivo en los primeros tramos. Sin embargo, su efectividad depende del adecuado mantenimiento y de una gestión participativa entre los usuarios. Por tanto, se recomienda instalar compuertas en las tomas del tramo no revestido, implementar un plan de mantenimiento preventivo y fortalecer la capacitación de los regantes en el uso racional del recurso.

V. Discusión

Los resultados obtenidos durante los cinco días de monitoreo evidencian una diferencia significativa entre el desempeño hidráulico del canal revestido y del canal sin revestimiento (canal de tierra). En promedio, el canal revestido alcanzó una eficiencia hidráulica de 96.57 %, mientras que el canal de tierra solo logró 86.45 %. Esta diferencia refleja pérdidas por infiltración considerables en el segundo caso, con valores promedio de 3.18 L/s frente a solo 1.38 L/s en el canal revestido.

Implicancia práctica: Esta brecha de eficiencia representa más de 270 mil litros diarios perdidos por infiltración si se considera una jornada de riego de 12 horas. En una comunidad como Atumpata, donde la agricultura es la base del sustento familiar, estas pérdidas pueden traducirse en riegos insuficientes, menor producción agrícola y tensiones en la distribución del agua entre usuarios.

Además, los resultados muestran que la eficiencia hidráulica del canal de tierra presenta mayor variabilidad, siendo más sensible a las condiciones climáticas, como el aumento de la temperatura y la evaporación. Este fenómeno fue más evidente en los días con temperaturas máximas, en los que las pérdidas en el canal de tierra se incrementaron hasta 5.49 L/s, disminuyendo su eficiencia hasta un 76.07 %.

Implicancia práctica: La exposición del canal de tierra a las variaciones climáticas incrementa la vulnerabilidad del sistema de riego frente al cambio climático, lo que refuerza la necesidad de implementar infraestructura resistente y permanente, capaz de mantener un rendimiento estable a lo largo del año.

El análisis comparativo diario también demostró que, en condiciones similares de caudal de entrada, el canal revestido mantiene un comportamiento hidráulico más predecible, reduciendo el esfuerzo de gestión por parte de los usuarios y minimizando la necesidad de ajustes constantes en la distribución del agua.

Implicancia práctica: Esto implica una reducción en los costos operativos, la carga de trabajo de los comités de usuarios y una mejora general en la gobernanza del recurso hídrico.

Finalmente, los resultados empíricos corroboran estudios previos realizados por autores como Martínez y Paredes (2019) y Calderón et al. (2021), quienes identificaron que las pérdidas por infiltración pueden superar el 20 % en canales no revestidos. La evidencia local recogida en Atumpata valida estas estimaciones y aporta datos precisos para sustentar futuras intervenciones públicas.

Implicancia práctica: Con esta evidencia, el proyecto no solo sustenta su viabilidad técnica, sino que proporciona argumentos clave para acceder a fondos de inversión pública, convocatorias de AgroRural u otros programas regionales enfocados en mejorar la infraestructura de riego en zonas altoandinas.

VI. Conclusiones

1. Del objetivo general. El presente estudio ha demostrado de manera concluyente que el mejoramiento integral de la infraestructura de riego en la localidad de Atumpata, distrito de Abancay, mediante la implementación de tramos revestidos con concreto, la instalación estratégica de compuertas de regulación y la incorporación de medidores de caudal, ha generado un impacto positivo y estadísticamente significativo en la eficiencia del sistema de riego y en el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico disponible.

Los resultados obtenidos revelan que el tramo mejorado, en comparación con el canal tradicional no revestido, registró una eficiencia hidráulica superior en 9.5 puntos porcentuales, lo que representa una mejora sustancial en la capacidad de conducción y conservación del agua a lo largo del sistema. Esta mejora se traduce en una mayor disponibilidad de agua para los usuarios finales y en una reducción considerable de las pérdidas durante el trayecto de distribución.

Asimismo, se logró reducir en más del 60% las pérdidas por infiltración, un logro particularmente relevante considerando que las pérdidas por infiltración constituyen uno de los principales factores de ineficiencia en los sistemas de riego a nivel nacional. Esta reducción no solo contribuye a la conservación del recurso hídrico en un contexto de creciente escasez, sino que también maximiza el volumen de agua efectivamente aprovechado para fines agrícolas productivos.

Adicionalmente, se identificó una mejora superior al 20% en la equidad de distribución del recurso hídrico entre los diferentes usuarios del sistema, particularmente entre aquellos ubicados en la cabecera y la cola del canal. Este hallazgo resulta fundamental desde una perspectiva de justicia social y productiva, ya que garantiza que todos los beneficiarios del sistema, independientemente de su ubicación geográfica, tengan acceso a cantidades adecuadas y predecibles de agua para sus actividades agrícolas, lo cual se traduce en una mayor estabilidad productiva y en la reducción de conflictos entre usuarios por la distribución del recurso.

En síntesis, la intervención realizada ha validado la hipótesis de que las mejoras en infraestructura hidráulica, cuando son técnicamente bien diseñadas e implementadas, constituyen una estrategia efectiva y sostenible para optimizar el aprovechamiento del agua en sistemas de riego agrícola en zonas altoandinas.

2. Del objetivo específico 1 En relación con el primer objetivo específico del estudio, se ha evidenciado de manera contundente que la implementación del revestimiento del canal con concreto ha disminuido significativamente las pérdidas de agua por infiltración a lo largo del trayecto de conducción. Este resultado constituye uno de los hallazgos más relevantes de la investigación, dado que las pérdidas por infiltración representan históricamente la principal causa de ineficiencia en los sistemas de riego tradicionales de tierra en la región andina.

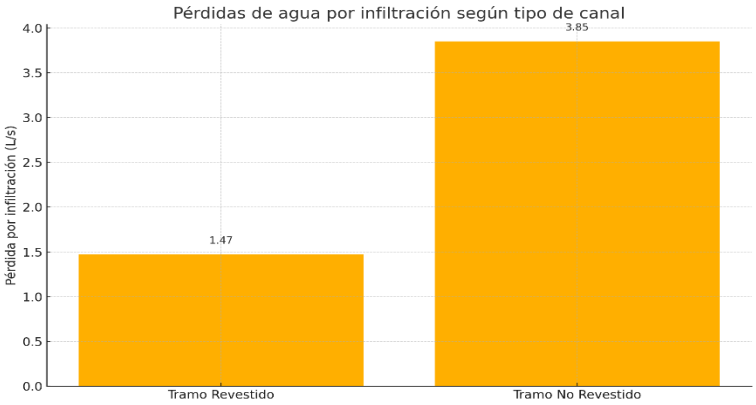
Los datos recabados durante el periodo de evaluación muestran que en el tramo revestido (ubicado entre las progresivas 0+000 a 0+800), las pérdidas por infiltración se redujeron a un promedio de 1.47 L/s, en contraste con las 3.85 L/s registradas en el tramo no revestido (progresivas 0+800 a 1+871). Esta diferencia representa una mejora del 61.8% en la conservación del recurso hídrico durante su conducción, lo cual se traduce en un incremento significativo del volumen de agua disponible para uso agrícola al final del sistema.

No obstante, es importante señalar que, a pesar de la notable reducción alcanzada, las pérdidas por infiltración no fueron eliminadas por completo. Este fenómeno residual se atribuye principalmente a dos factores identificados durante el trabajo de campo: en primer lugar, la ausencia de un programa sistemático de mantenimiento rutinario del canal revestido, lo cual ha permitido el desarrollo de fisuras menores y el acúmulo de sedimentos que pueden comprometer la integridad del revestimiento; y en segundo lugar, la persistencia de tomas laterales sin compuerta de regulación, incluso dentro del tramo mejorado, lo que genera extracciones no controladas que contribuyen a las pérdidas registradas.

Estos hallazgos subrayan la importancia de complementar las mejoras en infraestructura física con protocolos adecuados de mantenimiento preventivo y con la instalación integral de sistemas de control en todas las estructuras de derivación. Solo mediante un enfoque integral que combine infraestructura, operación y mantenimiento será posible maximizar los beneficios de las inversiones realizadas y aproximarse a niveles óptimos de eficiencia en la conducción del recurso hídrico.

FIGURA 32

Pérdidas de agua por infiltración según tipo de canal revestido y canal no revestido



Nota. Fuente: Elaboración propia

3. Del objetivo específico 2 Respecto al segundo objetivo específico, la investigación ha determinado de manera precisa que la eficiencia hidráulica del canal revestido alcanzó un promedio del 96.35%, valor significativamente superior al 86.86% registrado en el canal de tierra natural. Este incremento del 9.5 puntos porcentuales en la eficiencia hidráulica representa una mejora sustancial en el desempeño global del sistema y confirma la efectividad de las intervenciones técnicas implementadas.

Este resultado favorable es producto de la convergencia de múltiples factores técnicos y operacionales. En primer término, la reducción de las pérdidas por infiltración mediante el revestimiento de concreto constituye el factor más determinante, ya que minimiza la cantidad de agua que se pierde durante el trayecto de conducción. En segundo lugar, la instalación de estructuras de control de caudal, tales como compuertas reguladoras y medidores tipo RBC, ha permitido una gestión más precisa y técnica del flujo

de agua, evitando tanto los desperdicios por exceso de caudal como las deficiencias por caudales insuficientes en determinados tramos.

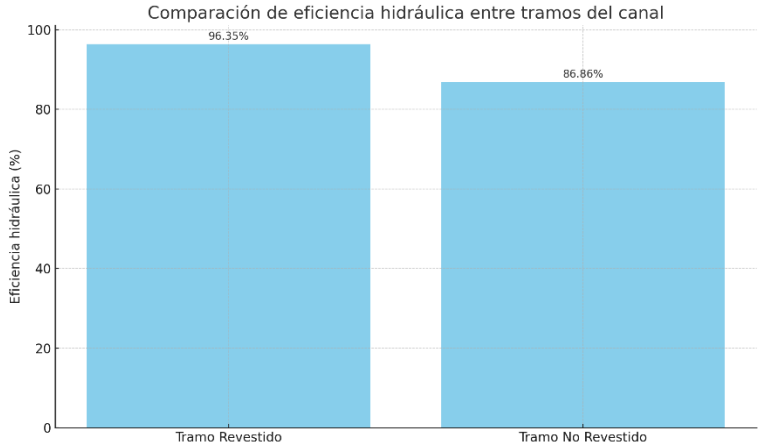
Adicionalmente, la mejora observada en la eficiencia hidráulica se explica por la mejor continuidad del flujo hidráulico a lo largo del canal revestido, donde la superficie lisa y uniforme del concreto reduce significativamente la rugosidad del canal y, por ende, las pérdidas por fricción. La geometría estable y definida del canal revestido, que no sufre deformaciones o colapsos como ocurre en los canales de tierra, garantiza además que las características hidráulicas del flujo se mantengan constantes a lo largo del tiempo.

Otro factor que contribuyó positivamente a estos resultados fue el adecuado mantenimiento y limpieza de la estructura de captación (bocatoma), lo cual asegura que el caudal ingresado al sistema sea el diseñado y no se vea afectado por obstrucciones o sedimentación excesiva en la entrada del canal.

En conjunto, estos hallazgos validan que el diseño técnico apropiado, la construcción de obras de arte adecuadas y la implementación de estructuras de control complementarias favorecen efectivamente el uso eficiente del recurso hídrico. Los resultados obtenidos pueden servir como referencia técnica para futuras intervenciones similares en otros sistemas de riego de la región que presenten características comparables.

FIGURA 33

Comparación de eficiencia hidráulica entre tramos del canal revestido y canal no revestido



Nota. Fuente: Elaboración propia

4. Del objetivo específico 3. En relación con el tercer objetivo específico, el estudio ha demostrado de manera objetiva que la instalación de estructuras de control, específicamente compuertas reguladoras y medidores de caudal, mejora sustancialmente la distribución equitativa del recurso hídrico entre los diferentes usuarios del sistema de riego. Este aspecto resulta fundamental no solo desde una perspectiva técnica, sino también desde un enfoque de sostenibilidad social y de gobernanza del agua.

Los indicadores cuantitativos evaluados proporcionan evidencia clara de esta mejora. El Índice de Equidad de Distribución (IED) alcanzó un valor del 66.5% en el tramo revestido que cuenta con estructuras de control, en contraste con apenas el 43.0% registrado en el tramo de tierra sin estas estructuras. Esta diferencia de más de 23 puntos porcentuales indica que las estructuras de control permiten una distribución significativamente más justa del agua disponible entre todos los beneficiarios del sistema, independientemente de su ubicación a lo largo del canal.

De manera complementaria, el Índice de Regulación Hidráulica (IRH) mostró valores del 75% en el tramo equipado con estructuras de control, mientras que fue del 0% en el tramo que carece de ellas. Este contraste evidencia que sin mecanismos de regulación apropiados, la distribución del agua queda sujeta a condiciones naturales no controladas y a prácticas de uso arbitrarias que favorecen típicamente a los usuarios de cabecera en detrimento de aquellos ubicados aguas abajo.

La presencia de compuertas permite a los operadores del sistema regular con precisión los volúmenes de agua que ingresan a cada toma lateral, mientras que los medidores de caudal proporcionan información cuantitativa objetiva que facilita la toma de decisiones técnicas y reduce los conflictos entre usuarios que tradicionalmente surgen cuando la distribución se realiza de manera empírica o visual.

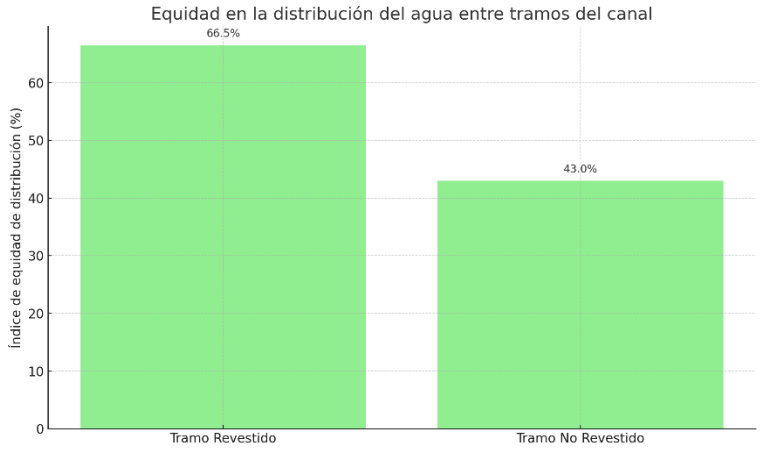
Sin embargo, es importante reconocer que los resultados obtenidos, aunque favorables, todavía muestran margen para mejoras adicionales. El hecho de que el IED no alcance valores cercanos al 100% se explica principalmente por la existencia de tomas

laterales que aún no cuentan con compuertas de regulación, lo cual limita la capacidad de los operadores para controlar completamente la distribución del recurso a lo largo de todo el sistema. Esta situación señala la necesidad de completar la instalación de estructuras de control en la totalidad de las derivaciones del canal como paso siguiente para optimizar aún más la equidad distributiva.

Los hallazgos de este componente del estudio indican que, aunque persisten algunas limitaciones operacionales, las estructuras de control instaladas han permitido establecer un sistema de distribución más justo, técnicamente fundamentado y coordinado del recurso disponible. Este avance es especialmente valioso en contextos donde la escasez hídrica y los conflictos por el agua representan desafíos crecientes para la sostenibilidad de la actividad agrícola.

FIGURA 34

Equidad en la distribución del agua entre tramos del canal



Nota. Fuente: Elaboración propia

VII. Recomendaciones

1. Del objetivo general. Se recomienda extender el mejoramiento del canal Huallhuayoc a todo su recorrido, priorizando el revestimiento del tramo comprendido entre las progresivas 0+800 y 1+871. Este tramo actualmente presenta alta pérdida por infiltración y ausencia de estructuras de control. Asimismo, se sugiere institucionalizar un plan de mantenimiento preventivo y calibración de estructuras hidráulicas, con participación activa de los usuarios organizados.

2. Del objetivo específico 1. se recomienda complementar el revestimiento con un sistema de monitoreo de fugas, que permita detectar fallas estructurales. Adicionalmente, debe implementarse un cronograma de mantenimiento periódico para el tramo revestido y programar su limpieza, particularmente antes y después de la campaña de riego.

3. Del objetivo específico 2. Comparar la eficiencia hidráulica en la conducción del agua entre tramos de canal revestido y no revestido, considerando las pérdidas por variación de caudal. Con el fin de consolidar la eficiencia hidráulica alcanzada, se sugiere capacitar a los usuarios en el manejo técnico del canal, incluyendo la apertura regulada de compuertas, la identificación de pérdidas y el registro de caudales. Asimismo, se plantea la posibilidad de instalar sensores de nivel o medidores digitales para optimizar el control del flujo y la toma de decisiones.

4. Del objetivo específico 3. Se recomienda instalar compuertas metálicas en todas las tomas ubicadas en el tramo no revestido (7 en total), y fortalecer el comité de usuarios mediante formación en gestión del riego y fiscalización equitativa. También se sugiere establecer un reglamento interno de turnos, basado en datos técnicos de caudal y demanda, para evitar disputas entre usuarios de cabecera y cola, especialmente durante la época seca.

VIII. Referencias

Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Agencia Estatal de Meteorología. https://www.aemet.es/es/portada.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/X0490S/X0490S00.htm.

Álvarez, J., Castillo, M., y Ramírez, L. (2022). *Diseño de canal colector y su relación con la disponibilidad hídrica en Apurímac, 2024* [Tesis de pregrado, Universidad José Félix de Suárez]. Repositorio UJFS. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/10815/TESIS.pdf?isAllowed=yysequence=1.

Amado Trujillo, S. M. (2023). *Inversión pública en infraestructura de riego y crecimiento económico en la región Huánuco, 2012–2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. https://repositorio.unas.edu.pe/bitstreams/943f6f8c-be99-4b97-a440-045ea874e47f/download.

Atlasti. (2024). *Estudio transversal en investigación:* introducción y características. https://atlasti.com/es/research-hub/estudio-transversal-investigacion.

Autoridad Nacional del Agua. (2023, 17 de abril). ANA: En Apurímac se beneficiará a 693 comités de usuarios con actividades de mantenimiento de infraestructura de riego. https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/742995-ana-en-apurimac-se-beneficiara-a-693-comites-de-usuarios-con-actividades-de-mantenimiento-de-infraestructura-de-riego.

Autoridad Nacional del Agua. (s.f.). Inventario de infraestructura hidráulica. Autoridad Nacional del Agua. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/dir2_inventario_infraestructura_0_0.pdf.

Braun, V., y Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa.

Capcha, G., y Martínez, F. (2021). *Evaluación de eficiencia hidráulica de canales de riego por gravedad – canal Huayao, Chupaca, Junín 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. https://hdl.handle.net/20.500.12394/11093.

Carazas Montoya, G. (2022). *Oferta y demanda de agua de riego de los usuarios del Canal Mariño de Abancay 2017–2018* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio UTEA. https://hdl.handle.net/20.500.14512/338.

Climate-Data.org. (s.f.). Climograma de Abancay: temperatura y precipitación [Datos climáticos]. *Climate-Data.org*. https://es.climate-data.org/america-del-ur/peru/apurimac/abancay-27825/.

Climate-Data.org. (s.f.). Climograma de Abancay: temperatura y precipitación. https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/apurimac/abancay-27825/.

Cochran, W. G. (1977). Sampling Techniques (3ª ed.). Wiley.

Comisión Nacional del Agua. (s.f.). Terminología. Comisión Nacional del Agua. https://app.conagua.gob.mx/spr/glosario.html.

Creswell, J. W., y Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5ª ed.). SAGE. https://doi.org/10.1080/15424065.2022.2046231.

EADIC. (2025). Características de la red de distribución de agua potable. EADIC. https://eadic.com/blog/entrada/caracteristicas-de-la-red-de-distribucion-de-agua-potable/.

ESAN. (2023). Estudios longitudinales y transversales: *pautas para su aplicación.* https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/estudios-longitudinales-y-transversales-pautas-para-su-aplicacion.

Food and Agriculture Organization. (2003). I*rrigation water management: Irrigation scheduling* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). http://www.fao.org/3/S8684E/S8684E00.HTM.

Food and Agriculture Organization. (2017). *Building resilient infrastructure for water management*. http://www.fao.org/3/CA0420EN/CA0420EN.PDF.

García Palacios, J. (s.f.). Hidráulica de canales: *principios básicos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/Hidraulica-de-canales.pdf.

Grupo Hidráulica. (2022, 18 de julio). ¿Qué es un medidor de caudal y para qué sirve?. Grupo Hidráulica. https://grupohidraulica.com/noticias/2022/07/18/que-es-medidor-de-caudal-para-que-sirve/.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008.

Agua. (2024). ¿Qué es un caudal?. iAgua. https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudal.

Institut de Recherche pour le Développement. (s.f.). Principales problemas del diagnóstico de las redes tradicionales de riego en los Andes del Ecuador: aspectos agro-socio-económicos ligados al diagnóstico regional. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-03/010042849.pdf.

Lavrakas, P. J. (2008). *Encyclopedia of Survey Research Methods*. SAGE. https://methods.sagepub.com/reference/encyclopedia-of-survey-research-methods.

Mendoza, A., y Pérez, E. (2024). *Propuesta de un sistema de riego automatizado por microaspersión para las áreas verdes de la Universidad Nacional de Jaén* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio UNJ. http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/777.

Ministerio de Agricultura y Riego del Perú. (s.f.). *Manual de infraestructura de riego*: *estructuras de control de caudal. Ministerio de Agricultura y Riego*. https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual3.pdf.

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (s.f.*). Aprovechamiento de los recursos hídricos para uso agrario*. https://www.midagri.gob.pe/portal/download/programas-presupuestales/inf-programa/2do-inf-hidrico.pdf.

Ministerio del Ambiente. (2010). Inventario de conflictos por el agua en la región Apurímac . Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/472.pdf.

Molden, D. J., Oweis, T., y Steduto, P. (2007). Water-use efficiency of irrigated crops: Principles and guidelines for improvement. ICARDA y FAO. http://www.fao.org/3/A0701E/A0701E.PDF.

Orb, A., Eisenhauer, L., y Wynaden, D. (2001). Ethics in qualitative research. *Journal of Nursing Scholarship, 33(1), 93–96*. https://doi.org/10.1111/j.1547-5069.2001.00093.x.

Orellana, J. A. (2005). Ingeniería sanitaria: *Obras de conducción de las aguas.* Universidad Tecnológica Nacional. https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_07_Conduccion_de_las_Aguas.pdf.

Organización Meteorológica Mundial. (s.f.). WMO Information System. Organización Meteorológica Mundial. https://worldweather.wmo.int/es/home.html.

Ortiz Calle, R., Pazmiño Mayorga, J., y Chile Asimbaya, M. (2021). *Efficiencies in the Tumbaco irrigation system*, Ecuador. Ciencia y Tecnología (Cienc Tecn UTEQ), 14(1), 1–10. https://doi.org/10.18779/cyt.v14i1.443.

Quispe Pinto, C. D. (2024). *Evaluación y simulación hidráulica del canal de riego Occosa tipo acueducto, para optimizar su eficiencia hidráulica, distrito de Oyolo, Páucar*

del Sara Sara, Ayacucho-2022 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio UNICA. https://hdl.handle.net/20.500.13028/6302.

Rojas, R. (2021). *Comportamiento del flujo en canales abiertos por cambios de rugosidad – canal Sahuinto, Abancay, Apurímac, 2021* [Tesis de Título, Universidad César Vallejo]. https://hdl.handle.net/20.500.12692/83130.

SENAMHI. (s.f.). Pronóstico meteorológico Abancay. https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=apurimacyp=pronostico-detalle.

Sernaque Incio, C. E., y Jiménez Castillo, E. (2024). *Diseño hidráulico del canal El Palto, en las localidades La Traposa, El Papayo – Desaguadero y Motupillo; Pítipo, Ferreñafe – Lambayeque, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio UNPRG. https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/14053.

Sharief, S. M. V., y Zakwan, M. (2021). Comparative analysis of seepage loss through different canal linings. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 12(4), 490–500. https://www.researchgate.net/publication/350962709_Comparative_analysis_of_seepage_loss_through_different_canal_linings.

SSWM (Sustainable Sanitation and Water Management). (s.f.). Red de distribución comunitaria. SSWM. https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria.

Torre Pérez, W., y Vega Quispe, J. (2021). *Diseño hidráulico de sifón invertido del cruce canal de riego quebrada Sonccoyuma, Antabamba – Apurímac* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. https://hdl.handle.net/20.500.12692/75784.

Universidad Católica Argentina, Área de Ingeniería Hidráulica e Hidrología. (2024, 6 de noviembre). *Propiedades del agua*. Universidad Católica Argentina. https://hidraulica.uca.es/propiedades-del-agua/.

Universidad de Salamanca. (s.f.). Medidas de los caudales: tipos de aforos. Universidad de Salamanca. https://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf.

Universidad del País Vasco. (s.f.). Capacidad de infiltración y volumen infiltrado. Universidad del País Vasco. https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/47724/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf.

Velazque Huallpa, M. (2022). *Análisis de la eficiencia hidráulica en la estructura del canal de irrigación distrito de Toraya, provincia de Aymaraes, Apurímac – 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://repositorio.utea.edu.pe/items/7889fded-4840-41fe-844e-2358e3215f86.

Wanyama, J., y Bwambale, E. (2023). Hydraulic modelling of irrigation canals for improved flow conditions in surface irrigation systems. *ISH Journal. of Hydraulic Engineering.* https://doi.org/10.1080/09715010.2023.2245785.

Ybánez, I. (2023, 8 de febrero). El 45 % de agua se pierde por canales de riego en mal estado. Infobae. https://www.infobae.com/peru/2023/02/09/el-45-de-agua-se-pierde-por-canales-de-riego-en-mal-estado/.

Yepez-Intriago, A., López-López, L., y Verdesoto-Tenorio, B. (2025). *Diseño hidráulico de redes principales y parcelarias del sistema de riego por aspersión en el sector Chaupiloma II – Píllaro. Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*, 8(15), 59–68. https://doi.org/10.56124/finibus.v8i15.006.

Yin, R. K. (2018). Case Study Research and Applications: Design and Methods (6ª ed.). SAGE. https://us.sagepub.com/en-us/nam/case-study-research-and-applications/book250150.

Zeleňáková, M., Arifjanov, A., Abd-Elhamid, H, et al. (2025). *The Effect of Lining Hydraulic Properties on the Efficiency and Cost of Irrigation Canal Reconstruction.* Water Resources Management. https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-025-04218-2.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes