

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Evaluación del desempeño hidráulico en el sistema de riego del proyecto Mariño,
sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025**

Asesor:

MSc. Maldonado Mendivil, Ángel

Autor:

Zuloaga Gaspar, Luis David

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil

Abancay-Apurímac-Perú

2026



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Acta N°: 020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los nueve (05) días del mes de junio del 2026, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0386-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo
Dictaminante :	Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Huassan
Replicante :	Mag. HERRERA PONCE, Veriosca

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: ***Evaluación del desempeño hidráulico en el sistema de riego del proyecto Mariño, sector cuenca media, Abancay - Apurímac - 2025.***

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: **ZULOAGA GASPAS, Luis David**

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐.

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. ZULOAGA GASPAS, Luis David	12	APROBADO

Siendo las 12:40 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. ROLDÁN JUÁREZ, Américo

(.....)

Dictaminante: Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio

(.....)

Replicante: Mag. HERRERA PONCE, Veriosca

(.....)

Nota: Desaprobado: 0-10; Aprobado: 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

12% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 0%  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.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Zuloaga Gaspar, Luis David
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	74924589
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0009-7068-1888
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Maldonado Mendivil Ángel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de la 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	:	2024-2025
Fuente de financiamiento	:	Propia
Porcentaje de similitud	:	12%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, por otorgarme salud, vida y la fortaleza necesaria para perseguir mis sueños y culminar esta investigación con absoluta dedicación.

A mis padres, Nicolas Zuloaga y Justina Gaspar, por su compañía y apoyo incondicional en cada paso de esta importante etapa.

Y a mi hijo, Nicolas Alessandro, quien ha sido mi motor, mi mayor inspiración para seguir adelante y el motivo principal para consolidar este gran logro en mi vida.

Luis David Zuloaga Gaspar

Agradecimiento

A Dios, por brindarme la salud y la fortaleza necesarias para perseverar en mis metas y no rendirme ante las adversidades. A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional y por ser mi pilar en cada paso de este camino. A mi pareja y a mi hijo, quienes constituyen mi mayor inspiración y el motor que me impulsa a seguir adelante día a día. Asimismo, expreso mi más profundo agradecimiento a mi asesor por su valiosa guía y apoyo constante, y a los docentes, quienes con su sabiduría compartida fueron pilares fundamentales en nuestra formación profesional

Luis David Zuloaga Gaspar

Resumen

El proyecto se enmarca en la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico en la cuenca media del río Mariño, donde el canal Trujipata presentaba variabilidad en caudales y posibles desequilibrios operativos; por tanto, se planteó como problema principal cómo mejorar su desempeño hidráulico bajo condiciones reales de riego. El objetivo general fue analizar dicho desempeño mediante el cálculo del caudal de máxima eficiencia y la simulación computacional. La metodología empleada fue investigación aplicada de nivel descriptivo-correlacional con enfoque cuantitativo, diseño no experimental transeccional, utilizando fórmulas de Manning, mediciones de campo (pendiente y rugosidad) y simulaciones en SWMM 5.2, complementadas con instrumentos HCanales V3.1 y equipos topográficos. Los resultados indican un caudal óptimo de $0,0844 \text{ m}^3/\text{s}$ con tirante de $0,295 \text{ m}$, una simulación de 12 h que arrojó caudal promedio de $0,082 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal máximo de $0,084 \text{ m}^3/\text{s}$ y profundidades máximas de $0,96 \text{ m}$ en nodos críticos, sin desbordes en buzones (ocupación entre 36 % y 72 %) y descarga total de 3,53 millones de litros. La conclusión principal señala que, aunque el canal opera eficientemente en régimen subcrítico, los tramos con flujo a presión requieren monitoreo y ajustes operativos para garantizar su estabilidad.

Palabras Clave: riego, eficiencia hidráulica, simulación, canal Trujipata, Manning

Abstract

The project was framed within the need to optimize water resource use in the middle basin of the Mariño River, where the Trujipata Canal presented flow variability and potential operational imbalances. Therefore, the main objective was to improve its hydraulic performance under real-life irrigation conditions. The overall objective was to analyze this performance by calculating the maximum efficiency flow rate and performing computational simulations. The methodology employed was applied descriptive-correlational research with a quantitative approach, a non-experimental cross-sectional design, using Manning's formulas, field measurements (slope and roughness), and simulations in SWMM 5.2, complemented by HCanales V3.1 instruments and topographic equipment. The results indicate an optimal flow rate of $0.0844 \text{ m}^3/\text{s}$ with a depth of 0.295 m , a 12-h simulation that yielded an average flow rate of $0.082 \text{ m}^3/\text{s}$, a maximum flow rate of $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$ and maximum depths of 0.96 m at critical nodes, with no overflows at manholes (occupancy between 36% and 72%) and a total discharge of 3.53 million liters. The main conclusion indicates that, although the canal operates efficiently in a subcritical regime, the sections with pressurized flow require monitoring and operational adjustments to ensure their stability.

Keywords: irrigation, hydraulic efficiency, simulation, Trujipata canal, Manning

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	xii
Índice de Anexos	xiii
I. Introducción	14
II. Planteamiento del problema.....	16
2.1 Descripción y formulación del problema	16
2.2 Objetivos.....	18
2.2.1 Objetivo General.....	18
2.2.2 Objetivos Específicos.....	18
2.3 Justificación e importancia.....	18
2.4 Hipótesis	23

2.5	Variables	24
III.	Marco Teórico.....	26
3.1	Antecedentes	26
3.2	Bases teóricas.....	33
3.3	Definición de términos.....	67
IV.	Metodología	70
4.1	Tipo y nivel de investigación	70
4.2	Ámbito temporal y espacial	72
4.3	Población y muestra	72
4.4	Instrumentos.....	73
4.5	Procedimientos.....	74
4.6	Análisis de datos	74
4.7	Consideraciones éticas	74
V.	Resultados y discusión	76
VI.	Conclusiones	98
VII.	Recomendaciones.....	100
VIII.	Referencias	102
IX.	Anexos.....	109

Índice de Tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables	25
----------------	---------------------------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1	Ubicación del canal de conducción Trujipata	78
Figura 2	Características geométricas para un tubo parcialmente lleno	80
Figura 3	Caudal máximo calculado para el canal	81
Figura 4	Esquema del tramo evaluado del canal Trujipata.....	82
Figura 5	Dimensiones de los buzones de inspección.....	83
Figura 6	Resumen del caudal afluente por nodo en el canal Trujipata.....	84
Figura 7	Resumen de profundidades por nodo en el canal Trujipata	85
Figura 8	Volumen de almacenamiento y descarga en los buzones de inspección.....	86
Figura 9	Caudal descargado en la salida del sistema (Out1)	86
Figura 10	Resumen de caudales, velocidades y condiciones de llenado en las conducciones del canal Trujipata	87
Figura 11	Clasificación del régimen de flujo en los tramos del canal Trujipata	88
Figura 12	Perfil de elevación del agua en el al inicio de la simulación (00:02).....	89
Figura 13	Perfil de elevación del agua en hora de caudal máximo (11:58)	90
Figura 14	Simulación del nivel de agua en los buzones de inspección durante el caudal pico	91

Índice de Anexos

Anexo 1	Matriz de Consistencia	110
Anexo 2	Matriz de Operacionalización de variables	111
Anexo 3	Planos topográficos	112

I. Introducción

La gestión eficiente del recurso hídrico es una prioridad en el desarrollo sostenible de las regiones altoandinas del Perú, especialmente en el departamento de Apurímac, donde el sector agrícola representa el 93.53 % de la demanda total de agua, seguido del uso poblacional (6.33 %) e industrial (0.14 %) (SINIA, 2019). En este contexto, el sistema de riego del proyecto Mariño, ubicado en la cuenca media de la provincia de Abancay, constituye una infraestructura clave para garantizar la productividad agrícola, la seguridad alimentaria local y el uso racional del agua.

La cuenca del río Mariño se caracteriza por un uso intensivo del recurso hídrico, tanto para fines agrícolas como para el abastecimiento urbano. De acuerdo con estudios técnicos, la eficiencia de conducción de los canales en la región alcanza solo el 47 %, la eficiencia de distribución es del 51 % y la eficiencia de aplicación en parcela es del 50 %, lo que conlleva a una eficiencia global del sistema de riego del 14 % (SINIA, 2017). Esta baja eficiencia refleja pérdidas significativas del recurso hídrico y evidencia problemas estructurales y operativos en la infraestructura de riego, afectando directamente el aprovechamiento del agua por parte de los productores agrícolas.

Asimismo, se ha identificado un importante déficit hídrico en la cuenca del río Mariño. Según datos hidrológicos, el volumen disponible de agua con una persistencia del 75 % es de 11.57 Hm³, mientras que la demanda para riego asciende a 20.36 Hm³, lo que genera un déficit de 8.79 Hm³ durante los periodos de estiaje (Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM], 2021). Este desequilibrio entre oferta y demanda refuerza la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico disponible a través de un análisis integral del sistema de riego.

Frente a este escenario, se han ejecutado iniciativas orientadas a mejorar la seguridad hídrica en la microcuenca Mariño. El proyecto “Agua para Abancay y Comunidades, para

siempre”, implementado entre 2020 y 2023, logró resultados concretos como el cercado de 2,209 hectáreas de pastos naturales, la forestación de 56 hectáreas con especies nativas, y la construcción de diques y ccochas que permitieron almacenar un total de 47,432 m³ de agua, beneficiando tanto al uso agrícola como poblacional (Helvetas Perú, 2023). Estas acciones evidencian la importancia de implementar medidas de conservación y mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el nivel de aprovechamiento hídrico en el sistema de riego del proyecto Mariño, sector cuenca media, en Abancay – Apurímac, durante el año 2025. El estudio se enfocará en cuantificar las pérdidas en la conducción, analizar la eficiencia hidráulica del sistema y examinar la gestión de la distribución del agua, con el fin de identificar oportunidades de mejora que permitan optimizar el uso del recurso hídrico y contribuir al desarrollo sostenible del sector agrícola en la región.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

El recurso hídrico en el departamento de Apurímac tiene una importancia estratégica para la agricultura, actividad que representa la principal fuente de sustento de la población rural. En esta región, el 93.53 % del uso del agua corresponde a la agricultura, mientras que solo el 6.33 % se destina al uso poblacional y el 0.14 % al industrial, lo que refleja la elevada dependencia de este sector económico frente al recurso hídrico (SINIA, 2019). Sin embargo, la infraestructura hidráulica existente en gran parte del territorio apurimeño, incluyendo Abancay, presenta deficiencias técnicas, antigüedad en sus estructuras y escasa eficiencia operativa, lo que limita el adecuado aprovechamiento del agua disponible.

Particularmente, en la cuenca del río Mariño, considerada una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de la ciudad de Abancay y sus alrededores, se ha evidenciado una crítica situación de ineficiencia en el sistema de riego. Según el Diagnóstico Ambiental Regional, la eficiencia de conducción de los canales es de apenas 47 %, mientras que la eficiencia de distribución es del 51 % y la de aplicación en campo alcanza solo el 50 %. Esto da como resultado una eficiencia global de riego de apenas 14 % (SINIA, 2017), lo que significa que más del 85 % del agua extraída para riego no es aprovechada de manera efectiva por los cultivos.

Esta baja eficiencia se agrava con el evidente déficit hídrico presente en la cuenca. De acuerdo con la Universidad Nacional Agraria La Molina (2021), el volumen disponible al 75 % de persistencia en la cuenca Mariño es de 11.57 Hm³, mientras que la demanda hídrica para riego asciende a 20.36 Hm³, generando un déficit de 8.79 Hm³ anuales. Esta situación compromete seriamente la continuidad del servicio de riego durante la temporada de estiaje, obligando a los agricultores a restringir el área cultivada o a adoptar prácticas que muchas veces resultan insostenibles.

Adicionalmente, se debe considerar que la microcuenca Mariño también abastece el 100 % del agua potable que consume la ciudad de Abancay, a través de la EPS Emusap Abancay, generando una creciente competencia por el uso del agua entre los sectores agrícola y poblacional (Helvetas Perú, 2023). Esta presión sobre la disponibilidad hídrica requiere de un análisis técnico urgente sobre el estado del sistema de riego y su eficiencia en el uso del recurso.

En respuesta a esta problemática, se han implementado iniciativas como el proyecto “Agua para Abancay y Comunidades, para siempre”, el cual logró, entre 2020 y 2023, la forestación de 56 hectáreas, el cercado de 2,209 hectáreas de pastos naturales y la construcción de diques y ccochas con capacidad para almacenar 47,432 m³ de agua (Helvetas Perú, 2023). No obstante, estos avances deben complementarse con evaluaciones técnicas específicas del sistema de riego, a fin de identificar las principales pérdidas de agua, debilidades estructurales y oportunidades de optimización del aprovechamiento hídrico.

Esta realidad evidencia la necesidad de realizar una evaluación detallada del sistema de riego del proyecto Mariño en el sector cuenca media, con el propósito de proponer estrategias de mejora que permitan incrementar la eficiencia en el uso del recurso, garantizar la sostenibilidad agrícola y reducir la presión sobre la fuente hídrica común.

2.1.1 Problema general

¿Cómo influyen el cálculo del caudal óptimo y la simulación computacional en SWMM en el desempeño hidráulico del canal Trujipata del sistema de riego del proyecto Mariño, sector cuenca media, Abancay – Apurímac – 2025?

2.1.2 Problemas Específicos

a. ¿de qué manera la determinación del caudal correspondiente a la condición de máxima eficiencia hidráulica del canal Trujipata contribuye a optimizar su desempeño hidráulico del sector cuenca media, Abancay – Apurímac – 2025?

b. ¿cómo permite la simulación en SWMM, utilizando el caudal óptimo determinado, predecir el comportamiento hidráulico real del canal Trujipata del sector cuenca media, Abancay – Apurímac – 2025?

c. ¿en qué medida la evaluación de flujo a presión o posibles desbordes en los buzones de inspección facilita la identificación de los tramos críticos del canal Trujipata del sector cuenca media, Abancay – Apurímac – 2025?

2.2 Objetivos

2.2.1 *Objetivo General*

Analizar el desempeño hidráulico del canal Trujipata mediante el cálculo del caudal óptimo y simulación computacional, para identificar tramos críticos y proponer mejoras operativas sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

2.2.2 *Objetivos Específicos*

a. Determinar el caudal correspondiente a la condición de máxima eficiencia hidráulica del canal de conducción Trujipata sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

b. Simular el comportamiento hidráulico del canal de conducción Trujipata en el software SWMM utilizando el caudal óptimo determinado sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

c. Evaluar el desempeño hidráulico del canal, identificando tramos con flujo a presión o posibles desbordes en los buzones de inspección a lo largo del recorrido sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 *Justificación*

La presente investigación tiene una justificación práctica sólida, ya que busca brindar soluciones concretas a la problemática de ineficiencia en el uso del agua dentro del sistema

de riego del proyecto Mariño, en la cuenca media de Abancay. En esta zona, el sistema de riego representa un pilar fundamental para la producción agrícola local; sin embargo, las pérdidas de agua por conducción deficiente, la limitada eficiencia hidráulica y una gestión inadecuada del recurso hídrico afectan directamente la productividad de los cultivos, así como la sostenibilidad del uso del recurso en el mediano plazo.

De acuerdo con el Diagnóstico Ambiental Regional de Apurímac, la eficiencia de conducción en los sistemas de riego tradicionales es del 47 %, la eficiencia de distribución es del 51 % y la eficiencia de aplicación en campo es del 50 %, resultando en una eficiencia global de apenas 14 % (SINIA, 2017). Esta baja eficiencia técnica evidencia la necesidad de identificar con precisión los puntos críticos del sistema y proponer medidas prácticas de optimización.

Los resultados de esta investigación servirán como base técnica para que los comités de usuarios de riego, gobiernos locales y gestores hídricos puedan tomar decisiones informadas sobre intervenciones específicas en infraestructura, operación y manejo del sistema. Asimismo, se podrán establecer lineamientos prácticos como el revestimiento de canales, instalación de compuertas de control y mejora de prácticas de distribución parcelaria, que permitirán reducir pérdidas, maximizar el recurso disponible y fortalecer la seguridad hídrica agrícola.

En este sentido, el estudio tendrá una aplicación inmediata, con impacto directo en la eficiencia operativa del sistema de riego y en el desarrollo económico de las familias agricultoras beneficiarias del proyecto Mariño.

El presente estudio tiene una justificación social importante, ya que el acceso eficiente y sostenible al agua de riego es un factor determinante para el bienestar, la seguridad alimentaria y la economía familiar de cientos de productores agrícolas del sector cuenca media del proyecto Mariño, en la ciudad de Abancay. En esta zona, la agricultura

constituye no solo una actividad económica, sino una forma de vida ancestral profundamente ligada al territorio, y cuya sostenibilidad depende directamente del adecuado aprovechamiento del recurso hídrico.

Las comunidades agrícolas que forman parte del sistema de riego Mariño enfrentan múltiples limitaciones: baja eficiencia en la conducción del agua, pérdidas considerables durante la distribución, y una gestión comunitaria que no siempre cuenta con el soporte técnico necesario. Esta realidad ha contribuido a la disminución de los rendimientos agrícolas, reducción de áreas cultivadas y, en muchos casos, a procesos de migración hacia zonas urbanas en busca de mejores oportunidades. Por tanto, optimizar el uso del agua de riego en estas comunidades representa una estrategia concreta para mejorar la calidad de vida de la población rural.

Además, la cuenca Mariño no solo abastece de agua a los agricultores, sino también al total de la población urbana de Abancay, que depende en un 100 % de esta fuente hídrica para su consumo diario (Helvetas Perú, 2023). Esta interdependencia entre lo rural y lo urbano evidencia que los beneficios de una mejor gestión del agua de riego no se limitan al sector agrícola, sino que contribuyen al equilibrio social, la salud pública y la estabilidad territorial.

El desarrollo de esta investigación permitirá generar evidencia que oriente políticas locales de gestión integrada del recurso hídrico, promueva el fortalecimiento de las organizaciones de usuarios y fomente la participación activa de las comunidades en la sostenibilidad del sistema. De este modo, se busca reducir las brechas de acceso equitativo al agua, promover la inclusión rural y garantizar el derecho humano al agua como bien común y esencial para la vida...

La presente investigación se sustenta teóricamente en la necesidad de comprender y aplicar los fundamentos de la ingeniería hidráulica y la gestión integrada de recursos hídricos, en el contexto específico de los sistemas de riego en zonas altoandinas. El concepto de aprovechamiento hídrico está directamente vinculado con la eficiencia de los sistemas de riego, entendida como la relación entre el volumen de agua efectivamente utilizado por los cultivos y el volumen total entregado a lo largo del sistema. Este enfoque requiere el análisis de indicadores como la eficiencia de conducción, distribución y aplicación del agua, así como las pérdidas por infiltración, evaporación o fugas (FAO, 2017).

Asimismo, esta investigación se apoya en la teoría de la eficiencia hidráulica de los sistemas de riego, la cual permite identificar las limitaciones físicas, técnicas y operativas que impiden un uso óptimo del recurso hídrico. De acuerdo con estudios técnicos, la eficiencia global del riego en la región de Apurímac es apenas del 14%, considerando una eficiencia de conducción del 47%, distribución del 51% y aplicación en campo del 50% (SINIA, 2017). Este sustento empírico respalda la necesidad de aplicar modelos de evaluación que permitan medir el desempeño del sistema de riego en condiciones reales.

Por otro lado, se consideran también los aportes teóricos de la gestión del recurso hídrico desde una perspectiva territorial e integrada, que reconoce el papel de los actores sociales, comités de usuarios y gobiernos locales en la operación, mantenimiento y sostenibilidad del sistema. La teoría de la gobernanza hídrica destaca la importancia de incluir variables sociales y organizativas en el análisis del rendimiento técnico de los sistemas de riego (GWP, 2019). En el caso del proyecto Mariño, esta perspectiva es clave, ya que el sistema está gestionado en parte por organizaciones de usuarios que influyen en la eficiencia general del aprovechamiento del agua.

En ese sentido, la investigación no solo contribuirá a validar herramientas técnicas de medición de eficiencia hidráulica, sino que también permitirá contrastar teorías sobre la

gestión y distribución del recurso en condiciones reales de uso. Además, se espera que los resultados obtenidos aporten nuevos conocimientos aplicables a otros sistemas de riego en condiciones similares, fortaleciendo así el marco teórico y práctico en el ámbito de la ingeniería agrícola y los recursos hídricos.

La presente investigación se justifica metodológicamente porque adopta un enfoque cuantitativo, el cual permite recolectar, procesar y analizar datos objetivos sobre el sistema de riego, como caudales, pérdidas por conducción, eficiencia hidráulica y distribución del recurso. Este enfoque es pertinente cuando se busca medir variables con precisión y establecer relaciones entre fenómenos observables (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

El estudio se enmarca dentro de un diseño no experimental y de tipo descriptivo, dado que no se manipularán las variables, sino que se observarán en su contexto natural. Este tipo de diseño es adecuado cuando el propósito es examinar situaciones tal como ocurren en la realidad y describir sus componentes de forma detallada (Sampieri et al., 2014). En este caso, se describirá el funcionamiento del sistema de riego del proyecto Mariño, evaluando el nivel de aprovechamiento hídrico en condiciones reales.

Para ello, se utilizarán técnicas especializadas como el levantamiento topográfico de tramos de canal, aforos de caudal en puntos estratégicos, así como observación directa estructurada en campo. Estas herramientas permitirán calcular parámetros clave como la eficiencia de conducción, distribución y aplicación, fundamentales para valorar el desempeño hidráulico del sistema (FAO, 2017).

Además, se aplicará un muestreo combinado: probabilístico para la medición de caudales y no probabilístico intencionado para seleccionar tramos representativos de estudio. Esta metodología permitirá asegurar representatividad y profundidad en el análisis técnico, generando información útil y confiable para orientar decisiones de mejora estructural y

operativa del sistema de riego, conforme a criterios de sostenibilidad hídrica y eficiencia agrícola.

2.3.2 Importancia

El estudio del desempeño hidráulico del canal Trujipata es esencial para maximizar la eficiencia en el uso del agua en una región altoandina donde este recurso es limitado. Al reducir pérdidas por fricción e infiltración y prevenir eventos de sobrepresión, se incrementa la disponibilidad de agua para ciclos de cultivo adicionales y se mitiga el riesgo de estrés hídrico en periodos críticos. Además, el protocolo metodológico que une fórmulas clásicas con simulaciones dinámica puede replicarse en otros sistemas de riego tecnificado de la zona, ofreciendo un modelo de gestión integral para autoridades regionales y comités de usuarios, y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

La combinación del cálculo del caudal óptimo y la simulación en SWMM mejora significativamente el desempeño hidráulico del canal Trujipata, al permitir identificar con precisión los tramos críticos y, en consecuencia, proponer mejoras operativas en el sector cuenca media de Abancay – Apurímac – 2025.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- a.** La determinación del caudal de máxima eficiencia hidráulica incrementa la eficiencia global del canal Trujipata en el sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.
- b.** La simulación en SWMM, utilizando el caudal óptimo determinado, predice con alta precisión el comportamiento hidráulico (niveles y velocidades) del canal Trujipata en el sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

c. La evaluación de flujo a presión o posibles desbordes en los buzones de inspección permite caracterizar con exactitud los tramos críticos del canal Trujipata en el sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025.

2.5 Variables

VARIABLE DEPENDIENTE

VD: Desempeño hidráulico.

VARIABLE INDEPENDIENTE

VI: Sistema de riego.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Variable D: Desempeño hidráulico	“El desempeño de un sistema de riego se evalúa mediante indicadores específicos tales como eficiencia global, uniformidad de aplicación y suministro relativo de agua, que permiten analizar cuantitativamente cómo funciona el sistema y detectan fallas en su gestión hidráulica” (Prieto et al., 2014, p. 55).	Evaluación cuantitativa del comportamiento hidráulico del canal Trujipata mediante la medición de caudal, velocidad, profundidad, régimen de flujo y posibles desbordes, a partir de simulaciones realizadas con el software SWMM y verificación en campo.	• Eficiencia hidráulica • Estabilidad del flujo • Condición de operación	• Caudal máximo (m³/s) • Velocidad media (m/s) • Profundidad hidráulica (m) • Porcentaje de llenado (%)	Razón	• Simulación en SWMM 5.2 • HCanales V3.1
Variable I: Sistema de riego	Los sistemas de riego son mecanismos que permiten desviar el agua desde su lugar de almacenamiento hasta los campos agrícolas, con el propósito de incrementar el agua disponible para los cultivos e intensificar el rendimiento de los mismos (Food and Agriculture Organization [FAO], 2009).	Descripción técnica y funcional del canal Trujipata, incluyendo el diseño de la conducción, tipo de tubería, pendientes, estructuras hidráulicas (buzones, válvulas), y características de operación recolectadas en el tramo evaluado.	• Infraestructura instalada • Parámetros de diseño • Operación y mantenimiento	• Tipo y material de tubería • Longitud del canal (m) • Pendiente instalada (m/m) • Frecuencia de mantenimiento	Razón	• Fichas técnicas • Planos de diseño • Verificación en campo

Nota. En la tabla se muestra la identificación de las variables con sus conceptos, indicadores, dimensiones y el instrumento a usar para determinar

dichas variables. Fuente: Elaboración propia

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

Por otro lado, Haile et al. (2020) realizaron un estudio titulado “Evaluación de la programación del riego y la eficiencia de aplicación como línea base para revitalizar el sistema de riego Meki-Ziway en Etiopía”, el cual tuvo como finalidad analizar las condiciones operativas de riego superficial en dicho esquema. El enfoque metodológico fue cuantitativo, con diseño no experimental y corte transversal. Se aplicaron mediciones en campo durante cuatro semanas, utilizando sensores de humedad, baldes de aforo y registros manuales para determinar la eficiencia de aplicación. Se trabajó en cuatro parcelas agrícolas distribuidas en distintas zonas del esquema. Los resultados indicaron que la eficiencia de aplicación promedio fue del 58.2%, con variaciones desde el 42.1% hasta el 77.3%, dependiendo del tipo de cultivo, pendiente del terreno y tipo de suelo. También se evidenciaron fallas en la programación de turnos de riego y pérdidas considerables por escorrentía y percolación. El estudio concluyó que la eficiencia del riego en el sistema Meki-Ziway se encuentra por debajo del nivel aceptable para un uso sostenible del agua, recomendándose una reorganización técnica del sistema, mejor formación a los agricultores y mantenimiento periódico de la infraestructura de distribución para reducir pérdidas y aumentar el aprovechamiento hídrico.

En ese sentido, Smith y Brown (2020) desarrollaron el estudio titulado “Evaluación de la eficiencia del uso del agua en la producción de cultivos utilizando el enfoque de Análisis Envolvente de Datos: un caso de Luisiana, EE.UU.”, cuyo propósito fue analizar la eficiencia técnica del uso del agua en la producción de soja en fincas agrícolas del estado de Luisiana. La metodología fue cuantitativa, no experimental, y aplicó el método DEA (Data Envelopment Analysis) en 45 unidades de producción agrícola. Se evaluaron variables como

volumen de agua aplicado, rendimiento por hectárea y costos de riego. Los resultados revelaron que la eficiencia técnica promedio fue de 78%, lo cual indica un 22% de potencial de mejora en el uso del agua. Las parcelas más eficientes alcanzaron 3.5 toneladas por hectárea con un consumo de 5,000 m³/ha, mientras que las menos eficientes produjeron solo 2.8 t/ha usando hasta 6,500 m³/ha. Se concluyó que es fundamental optimizar el uso del agua mediante tecnologías modernas y prácticas eficientes de riego, para garantizar sostenibilidad hídrica y mayores rendimientos agrícolas sin sobreexplotar los recursos disponibles.

Asimismo, Hakiruwizera et al. (2023) llevaron a cabo un estudio titulado “Evaluación del rendimiento de un sistema de riego por goteo dentro de un invernadero automatizado en condiciones ecológicas de Huye, Ruanda”, cuyo objetivo fue analizar el comportamiento hidráulico y la eficiencia del riego por goteo en un entorno protegido. El enfoque fue cuantitativo, con diseño experimental de bloques completamente al azar, aplicando análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de LSD. Se evaluaron parámetros como el caudal promedio, el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución (DU) en un invernadero automatizado. Los resultados mostraron un caudal promedio de 3.98 L/h, un CU de 99.96% y una DU de 57.72%, lo cual indica una alta precisión en la aplicación, pero una distribución no uniforme. Se concluyó que, aunque el sistema automatizado es eficiente en la entrega del agua, es necesario realizar ajustes en la disposición de los emisores y la presión de operación para lograr una distribución más homogénea y, por ende, un mayor aprovechamiento del recurso hídrico en cultivos protegidos.

De igual modo, Pratama y Mandela (2024) desarrollaron el estudio titulado “Evaluación de la efectividad de los sistemas de riego inteligente en la mejora de la productividad agrícola en Indonesia”, cuyo objetivo fue comparar el rendimiento de parcelas agrícolas utilizando sistemas de riego tradicional frente a tecnologías inteligentes basadas en IoT (Internet de las Cosas). La metodología fue cuantitativa, experimental, con grupos

aleatorios y medición de variables como volumen de agua utilizado, rendimiento de cultivo y humedad del suelo. El estudio se aplicó en cultivos de arroz en dos comunidades rurales. Los resultados indicaron que los sistemas inteligentes lograron un ahorro de agua del 47.8% y un incremento del rendimiento agrícola del 34.9% en comparación con sistemas tradicionales. También se redujo en un 22% el número de aplicaciones por campaña. Se concluyó que los sistemas de riego inteligente permiten optimizar el uso del agua y mejorar el rendimiento agrícola, siendo una solución tecnológica viable y sostenible para regiones con escasez hídrica o alta presión sobre recursos naturales.

Finalmente, Hameed y Jebur (2023) realizaron un estudio titulado “Análisis del rendimiento hidráulico de un sistema de riego por goteo alimentado por energía solar en Egipto”, cuyo propósito fue evaluar la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución bajo diferentes presiones de operación. El enfoque fue cuantitativo y experimental, aplicando aforos, mediciones de presión y caudal en líneas de riego instaladas en parcelas de tomate en el Valle del Nilo. Los resultados mostraron una eficiencia de aplicación del 90% y una uniformidad de distribución del 85% operando con una presión de 1.5 bar. A presiones menores (1.0 bar), la uniformidad cayó al 72%, indicando una fuerte dependencia de la presión para mantener niveles óptimos. Se concluyó que la adecuada selección de emisores y el control de presión en sistemas solares de riego por goteo son claves para garantizar la eficiencia hidráulica y el aprovechamiento del agua, especialmente en contextos rurales con acceso limitado a energía convencional..

3.1.2 A nivel nacional

En ese sentido, Cahua Villasante (2020) desarrolló el estudio titulado “Evaluación del sistema de riego por aspersión Huancasayani Ñacoreque y su relación con la producción agrícola en Cuyocuyo - Sandia”, con el objetivo de determinar la eficiencia de aplicación del riego en dicho sistema, ubicado en la región Puno. La metodología fue cuantitativa, de tipo

descriptiva-experimental, con recolección de datos en campo mediante mediciones de presión, caudal y uniformidad de distribución, aplicadas en 12 parcelas seleccionadas aleatoriamente. El sistema de riego operaba con un caudal promedio de 1.8 L/s y una presión de 30 psi. Los resultados evidenciaron una eficiencia de aplicación promedio de 65.4% y una uniformidad de distribución de 70.1%. Se observó que el 21% del agua se perdía por deriva de viento y el 13.5% por percolación profunda. Se concluyó que el sistema de riego requiere mejoras estructurales y operativas, así como capacitaciones técnicas a los usuarios. Además, se recomienda la implementación de programadores de riego y la instalación de válvulas reguladoras de presión para minimizar pérdidas y garantizar un mayor aprovechamiento hídrico en beneficio de la productividad agrícola.

Por otro lado, la Autoridad Autónoma de Majes – AUTODEMA (2022) ejecutó el proyecto de investigación titulado “AUTODEMA realiza investigación para mejorar el riego en la Pampa de Majes”, con el propósito de incrementar la eficiencia del uso del recurso hídrico en el sistema de irrigación de Majes, Arequipa. El enfoque fue cuantitativo, y se evaluaron parcelas piloto con distintas tecnologías de riego, como riego por goteo y riego por aspersión con sensores de humedad. Las mediciones se realizaron durante dos campañas agrícolas sobre cultivos de maíz y alfalfa. Se reportó que el sistema tradicional por gravedad tenía una eficiencia de aplicación del 55%, mientras que con riego por goteo se alcanzó hasta un 87%. Asimismo, se logró reducir en un 32% el volumen de agua aplicada por hectárea, pasando de 9,500 m³/ha a 6,460 m³/ha. Se concluyó que la tecnificación del riego representa una solución efectiva para optimizar el aprovechamiento del agua en zonas agrícolas de la costa peruana, permitiendo mayor sostenibilidad del recurso hídrico, mejor rendimiento de cultivos, y adaptación frente a la variabilidad climática en regiones como Arequipa.

Asimismo, Info región (2022) publicó el artículo técnico “La tecnología para el uso eficiente del agua en la agricultura”, en el cual se expone la situación crítica del recurso

hídrico en el Perú y la necesidad urgente de modernizar los sistemas de riego. Según el informe, el 80% del agua dulce disponible en el país se destina al sector agrícola, sin embargo, solo el 35% es aprovechado efectivamente por los cultivos, lo que representa pérdidas de hasta el 65% por escorrentía, evaporación e infiltración no controlada. El artículo analiza la implementación de tecnologías como el riego por goteo, aspersión y sensores de humedad, especialmente en regiones afectadas por sequías como Ayacucho, Cusco y Arequipa. Se concluyó que para enfrentar la escasez hídrica y aumentar la productividad, el Estado debe promover la adopción de riego tecnificado mediante subsidios, capacitación a agricultores y mejora de la infraestructura existente, ya que un incremento del 30% en eficiencia hídrica puede elevar el rendimiento agrícola hasta en un 40% en cultivos de alta demanda como papa y maíz.

De igual modo, Huanca Quiroz (2020) elaboró el estudio titulado “Determinación de la huella hídrica en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en la cuenca del río Ilave – Puno”, con el objetivo de calcular el volumen de agua total requerido para producir una tonelada de quinua, diferenciando los componentes de huella hídrica verde, azul y gris. La investigación utilizó un enfoque cuantitativo de tipo aplicada, y se recolectaron datos meteorológicos, características edáficas, volúmenes de riego y rendimiento agrícola durante dos campañas en 15 parcelas. Los resultados indicaron que la huella hídrica total promedio fue de 1,208 m³/tonelada, compuesta por 648 m³ de agua verde (lluvia), 408 m³ de agua azul (riego) y 152 m³ de agua gris (contaminación). Se concluyó que la eficiencia del uso del agua en el cultivo de quinua puede optimizarse reduciendo el uso del agua azul mediante técnicas de riego por aspersión o por goteo, promoviendo el uso del agua de lluvia almacenada y aplicando buenas prácticas agrícolas para minimizar el aporte de fertilizantes y pesticidas, lo que también reduce la huella hídrica gris y contribuye a una agricultura sostenible en la región.

Finalmente, Cáceres (2021) presentó el trabajo de investigación titulado “Evaluación de la huella hídrica en el cultivo de papa en la región de Puno”, con el propósito de determinar el volumen total de agua utilizada por tonelada de papa producida, bajo condiciones agrícolas de riego en altura. La metodología aplicada fue cuantitativa, de tipo aplicada y experimental, abarcando el análisis en 10 parcelas con distinto manejo técnico durante el ciclo agrícola 2020-2021. Se recolectaron datos sobre consumo de agua de riego, lluvia efectiva, tipo de suelo y rendimiento por hectárea. Los resultados arrojaron una huella hídrica total promedio de 931 m³/tonelada de papa, con valores que variaron entre 820 y 1,050 m³ según zona y prácticas de manejo. Se concluyó que mediante la implementación de sistemas de riego presurizado (aspersión o goteo), la rotación adecuada de cultivos, y la aplicación eficiente de fertilizantes orgánicos, es posible reducir la huella hídrica hasta en un 25%, contribuyendo directamente al aprovechamiento racional del recurso hídrico en zonas altoandinas donde el agua es escasa y la seguridad alimentaria depende de cultivos básicos como la papa.

3.1.3 A nivel regional y local

Por otro lado, la tesis de Contreras (2021) titulada “Evaluación de la eficiencia del sistema de riego Santa Rosa – distrito de Curahuasi – Apurímac – 2020” tuvo como finalidad analizar el nivel de aprovechamiento del agua en dicho sistema. La investigación aplicó una metodología cuantitativa no experimental, utilizando el método de balance hídrico, aforos de entrada y salida, así como encuestas a usuarios. Se evaluaron 3 tramos principales del canal de conducción, identificando pérdidas por filtración y derrame superficial. Los resultados mostraron que el canal presenta una eficiencia de conducción del 57.3%, y que el 42.7% del agua captada se pierde por evaporación, fugas y filtración en los primeros 4 km de conducción. Se concluyó que las pérdidas son atribuibles al deterioro del revestimiento de canal, la falta de compuertas funcionales y una deficiente operación comunitaria,

recomendando priorizar el revestimiento de tramos críticos y la capacitación técnica a los usuarios para mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico.

De igual modo, Velásquez (2023) elaboró la tesis “Análisis de eficiencia hídrica en el sistema de riego Llaullipata – Abancay – 2022”, cuyo objetivo fue determinar la eficiencia en la captación y conducción del sistema, localizado en el sector oeste de la ciudad de Abancay. Se aplicó una metodología de tipo experimental, evaluando la eficiencia de captación mediante aforos con vertederos tipo Thompson y mediciones de caudal en canal con corrección por pérdidas laterales. Se halló que el caudal captado promedio fue de 64 l/s, pero solo 38.5 l/s llegaron al punto de entrega, lo que representa una eficiencia de conducción del 60.15%. Se concluyó que el sistema presenta deficiencias críticas por falta de mantenimiento, obstrucción en canaletas secundarias y deterioro en la bocatoma principal. Se recomienda implementar revestimiento con geomembrana y automatizar la compuerta de ingreso, además de establecer un comité de operación y mantenimiento para garantizar un uso más eficiente del agua de riego.

Finalmente, el estudio de Mamani (2021), titulado “Evaluación del uso del recurso hídrico en el sistema de riego de las comunidades de Chacapuquio – distrito de Huanipaca – Apurímac”, tuvo como objetivo principal determinar el grado de aprovechamiento del agua en un sistema rural de conducción libre. Se empleó una metodología mixta (cuantitativa y cualitativa), evaluando el rendimiento hidráulico mediante aforos manuales en 5 puntos, encuestas a 62 comuneros y observación directa del sistema. Se halló que el rendimiento hídrico promedio fue del 54.2%, con un 45.8% de pérdidas, siendo las principales causas la erosión de taludes del canal, falta de limpieza y ausencia de compuertas. Se concluyó que para optimizar el uso del recurso hídrico se debe ejecutar un proyecto de mejoramiento integral del canal, con materiales duraderos y participación activa de los comuneros,

priorizando la cuenca media como zona crítica para garantizar el abastecimiento de agua agrícola durante todo el año.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Sistema de riego

3.2.1.1 Concepto de sistema de riego

Un sistema de riego es el conjunto de estructuras hidráulicas, dispositivos, prácticas operativas y elementos organizativos que permiten conducir, distribuir y aplicar agua a las áreas cultivables con el propósito de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, especialmente en zonas donde las precipitaciones son insuficientes o irregulares (FAO, 2017). Desde el enfoque hidráulico, se entiende como una red funcional que abarca la captación, conducción, distribución y aplicación del agua, considerando principios de hidráulica, caudales de diseño y eficiencia. Desde el enfoque agrícola, el sistema de riego es una herramienta fundamental para garantizar la disponibilidad oportuna de agua, optimizar los rendimientos agrícolas y reducir el riesgo de pérdidas por estrés hídrico en los cultivos (Cevallos & Montenegro, 2021). Ambos enfoques convergen en un objetivo común: mejorar la productividad agrícola y asegurar el uso racional del recurso hídrico.

Importancia del sistema de riego como infraestructura productiva en zonas rurales

Los sistemas de riego constituyen una de las infraestructuras más relevantes en las áreas rurales, ya que permiten transformar tierras con baja productividad en suelos altamente productivos, incrementando significativamente la seguridad alimentaria y los ingresos de las familias campesinas (MIDAGRI, 2020). En zonas rurales altoandinas como Apurímac, donde las precipitaciones son estacionales y muchas veces insuficientes, el riego representa un elemento vital para asegurar cultivos durante todo el año, permitiendo además diversificar la producción agrícola. Según datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, en Perú,

el uso del riego incrementa hasta en un 60% el rendimiento de los cultivos, y su disponibilidad reduce la migración rural y fortalece la economía local (MIDAGRI, 2020). Por ello, se considera una inversión estratégica en infraestructura productiva, tanto por su impacto económico como por su dimensión social.

Rol del sistema de riego en la gestión del recurso hídrico en cuencas agrícolas

En el contexto de la gestión integral de los recursos hídricos, los sistemas de riego cumplen un rol clave al actuar como instrumentos de regulación, control y uso eficiente del agua disponible en una cuenca. Estos sistemas permiten canalizar y distribuir el recurso de forma planificada, ajustándose a la oferta y demanda hídrica, lo que contribuye a evitar sobreexplotación y conflictos entre usuarios (ANA, 2022). Además, en cuencas agrícolas como la del río Mariño, donde la presión sobre el agua es alta debido a múltiples actividades (agricultura, consumo humano, etc.), la existencia de un sistema de riego organizado permite garantizar el abastecimiento durante los períodos críticos, favoreciendo la sostenibilidad ambiental y la resiliencia frente al cambio climático (Torres & Salazar, 2019). Su rol es especialmente importante para establecer turnos de riego, monitorear caudales, y coordinar con instancias como la ANA o las Juntas de Usuarios.

3.2.1.2 Clasificación de los sistemas de riego

Los sistemas de riego pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que el agua es aplicada al suelo y distribuida a los cultivos. Esta clasificación es fundamental para seleccionar el tipo más adecuado según las características del terreno, tipo de cultivo, disponibilidad de agua y nivel tecnológico del productor. Según la FAO (2017), los sistemas de riego más utilizados en la agricultura moderna y tradicional se agrupan en tres grandes categorías: por gravedad o superficie, presurizados y mixtos o combinados.

a) Sistemas de riego por gravedad o superficie

Los sistemas de riego por superficie se basan en el movimiento del agua por acción de la gravedad sobre el terreno. Son los más antiguos, económicos en instalación, pero menos eficientes si no se aplican adecuadamente. Se usan comúnmente en sistemas tradicionales.

Riego por surcos: Consiste en formar pequeños canales o surcos entre las hileras de cultivo. El agua se aplica en la parte alta y fluye a través del surco por gravedad. Este método es apropiado para cultivos en hileras como maíz, algodón, papa y caña de azúcar. Su eficiencia depende de la pendiente del terreno, la textura del suelo y la velocidad del flujo. Aunque es sencillo y económico, puede presentar pérdidas importantes por escurrimiento superficial y evaporación (Cevallos & Montenegro, 2021).

Riego por melgas o nivelación: Se basa en dividir el terreno en cuadros nivelados denominados melgas. El agua se introduce en cada melga desde un canal lateral, inundando toda la superficie de manera uniforme. Es eficaz en suelos con buena retención y en cultivos que toleran la presencia temporal de agua superficial, como alfalfa o arroz en algunos casos. Su eficiencia mejora si el terreno ha sido correctamente nivelado (Torres & Salazar, 2019).

Riego por inundación: Este método implica el anegamiento total del terreno con agua. Aunque es un sistema ancestral aún utilizado en arrozales y cultivos de pasto, presenta bajos niveles de eficiencia, pues se pierden grandes volúmenes por evaporación, escorrentía y percolación profunda. Sin embargo, en ciertos contextos tradicionales con abundante recurso hídrico y poca infraestructura, sigue siendo viable (FAO, 2017).

b) Sistemas de riego presurizado

Estos sistemas utilizan energía (gravedad o bombas) para impulsar el agua por medio de tuberías a presión, permitiendo una distribución más uniforme y controlada. Se adaptan bien a terrenos irregulares, son más eficientes en el uso del agua, aunque su instalación y mantenimiento son más costosos.

Riego por aspersión: Emite agua en forma de gotas a presión, simulando la lluvia. Se emplean aspersores que giran o son fijos, montados en tuberías móviles o fijas. Es útil para cultivos de cobertura total como hortalizas, trigo, pasto y maíz. Permite aplicar el agua con buena uniformidad y menor pérdida por escurrimiento, aunque puede verse afectado por el viento (Netafim, 2021).

Riego por microaspersión: Variante del anterior, pero diseñado para cubrir pequeñas áreas con baja presión y caudal. Se usa en cultivos de vivero, flores, cítricos o plantas hortícolas. Su ventaja radica en el uso eficiente del agua, con mínima afectación al follaje y el suelo (MIDAGRI, 2020).

Riego por goteo: Considerado el más eficiente de todos los sistemas, aplica agua gota a gota directamente en la raíz de las plantas. A través de mangueras con emisores o goteros, se controla el volumen exacto de agua, evitando pérdidas por evaporación o escorrentía. Se usa en frutales, viñedos, hortalizas y agricultura protegida. Puede alcanzar eficiencias superiores al 90% si está bien diseñado y mantenido (FAO, 2017).

c) Sistemas mixtos o combinados

Los sistemas combinados integran tecnologías de riego tradicional con componentes de riego presurizado, buscando mejorar la eficiencia sin reemplazar por completo las estructuras existentes. Por ejemplo, un sistema de conducción por canales abiertos puede combinarse con riego parcelario por goteo o aspersión. Esta estrategia es útil en zonas rurales donde no es viable una transformación completa del sistema, pero sí es posible introducir mejoras progresivas como compuertas reguladoras, tuberías secundarias o automatización de válvulas (ANA, 2022). Los sistemas mixtos permiten optimizar el uso del recurso hídrico sin grandes inversiones iniciales, adaptándose a contextos de escasez hídrica y limitaciones técnicas.

3.2.1.3 Componentes físicos del sistema de riego

Un sistema de riego eficiente depende no solo del método de aplicación, sino también de la adecuada disposición y funcionamiento de sus componentes físicos. Estos elementos están interconectados y garantizan la captación, conducción, distribución y aplicación del recurso hídrico. Su diseño debe adaptarse a las condiciones del terreno, tipo de fuente, volumen disponible y demanda agrícola (MIDAGRI, 2020).

a) Fuente de captación

La fuente de captación es el punto de origen del agua destinada al sistema de riego. Esta puede ser superficial (ríos, quebradas, lagunas naturales o artificiales) o subterránea (manantiales, puquiales o pozos). En zonas andinas como Apurímac, predominan los sistemas de captación de manantiales y cauces naturales. Las características hidrológicas y estacionales de la fuente determinan la frecuencia de riego, el caudal disponible y la necesidad de almacenamiento. Según ANA (2022), más del 75% de los sistemas comunales de riego en la sierra peruana captan agua de quebradas y manantiales no regulados.

b) Bocatoma

La bocatoma es la estructura hidráulica encargada de derivar el agua desde la fuente hacia el sistema de conducción. Puede ser de tipo fijo, cuando es permanente y está construida con materiales como concreto armado, o móvil, cuando utiliza compuertas temporales o estructuras portátiles. Su diseño varía según el caudal del río, pendiente del terreno, tipo de sedimento y requerimientos del sistema. Además, debe contar con estructuras de protección como muros de encauzamiento y desarenadores para evitar el ingreso de sólidos (PSI, 2018). Su correcta operación garantiza el suministro continuo y controlado del recurso hídrico.

c) Canal de conducción

Son los tramos principales encargados de transportar el agua desde la bocatoma hacia las zonas agrícolas. Pueden ser canales abiertos (revestidos con concreto, piedra,

geomembrana) o canales rústicos (excavados en tierra). También pueden emplearse tuberías cerradas en sistemas tecnificados. La eficiencia de conducción depende del revestimiento, la pendiente, el coeficiente de rugosidad y la existencia de pérdidas por infiltración o derrames. En promedio, los canales sin revestimiento presentan pérdidas de hasta el 40% del volumen conducido (MIDAGRI, 2020). Por ello, su mantenimiento periódico y diseño adecuado son fundamentales para evitar el desperdicio del recurso.

d) Canales de distribución

Se refiere a los ramales secundarios y terciarios que se derivan del canal principal y llevan el agua directamente a las parcelas agrícolas. Su correcta dimensionamiento y disposición aseguran la equidad en la entrega del recurso a los usuarios. Estos canales deben contar con compuertas o válvulas de regulación que permitan abrir o cerrar el paso del agua por turnos, conforme a las normas del sistema de riego comunal. Además, en sistemas tecnificados, estos canales pueden ser sustituidos por tuberías de polietileno o PVC, reduciendo las pérdidas (Torres & Salazar, 2019).

e) Estructuras complementarias

Incluyen todos los dispositivos e infraestructuras auxiliares que permiten operar, controlar y mantener adecuadamente el sistema. Entre ellos destacan:

- **Cajas de inspección:** permiten el monitoreo de flujos y el acceso a puntos clave del canal para limpieza.
- **Compuertas:** regulan el ingreso y derivación del agua.
- **Desarenadores:** eliminan partículas sólidas antes de que el agua ingrese a los canales de distribución.
- **Medidores de caudal:** permiten cuantificar el volumen entregado por parcela.

- **Disipadores de energía:** reducen la velocidad del agua para evitar erosión en pendientes fuertes.

Estas estructuras son esenciales para maximizar la eficiencia y garantizar la equidad en la entrega del recurso (PSI, 2018).

f) Área de riego o zona agrícola

Corresponde al conjunto de parcelas agrícolas beneficiadas por el sistema. Su organización, diseño parcelario, tipo de cultivo y manejo agronómico influyen directamente en la eficiencia del sistema. La delimitación clara de las zonas de riego permite planificar turnos, definir caudales requeridos por usuario y organizar a los agricultores en comités o juntas. Asimismo, el área de riego debe considerar aspectos como la topografía, accesibilidad y capacidad de carga del sistema de conducción (ANA, 2022). Un sistema bien diseñado debe cubrir eficientemente toda la superficie cultivable programada.

3.2.1.4 Funcionamiento hidráulico del sistema de riego

El funcionamiento hidráulico de un sistema de riego se refiere al conjunto de procesos físicos y operativos mediante los cuales el agua es captada, conducida, distribuida, aplicada y eventualmente drenada en un área agrícola determinada. Este funcionamiento debe garantizar un uso eficiente del recurso, minimizando pérdidas y asegurando una entrega equitativa y oportuna a cada usuario del sistema (MIDAGRI, 2020).

Proceso de captación y derivación

La captación es la fase inicial del sistema, en la cual se extrae el agua desde una fuente natural o artificial, como ríos, manantiales, lagunas o reservorios. Esta captación puede realizarse de forma directa mediante una bocatoma fija o móvil, o por medio de sistemas de bombeo en caso de fuentes subterráneas o presas (PSI, 2018). La derivación implica desviar el flujo hacia un canal o tubería que transportará el agua hacia el sistema de

distribución. Este proceso debe incluir estructuras de desarenado y control de sólidos, a fin de evitar obstrucciones y daños a las infraestructuras posteriores (FAO, 2017).

Regulación y control de caudales

Una vez que el agua ha sido derivada, es esencial contar con mecanismos de regulación hidráulica que permitan controlar el caudal y presión en cada tramo del sistema. Las compuertas, válvulas de control y vertederos son dispositivos clave para mantener un flujo constante y adecuado. Estos elementos permiten regular el ingreso de agua a diferentes canales, proteger el sistema de sobrecargas y garantizar que el recurso llegue a los usuarios con el volumen necesario (Cevallos & Montenegro, 2021). Además, el uso de medidores de caudal facilita la administración transparente del agua, especialmente en sistemas comunales con distribución por turnos.

Distribución proporcional o rotativa

En la distribución del agua hacia los usuarios, se aplican principalmente dos modalidades: distribución proporcional y distribución rotativa. La proporcional asigna un volumen de agua en función del tamaño de parcela o del número de acciones del usuario, siendo más común en sistemas tecnificados. En cambio, la distribución rotativa se basa en un sistema de turnos en el que cada usuario recibe agua por un período determinado, generalmente usado en sistemas tradicionales de sierra peruana (ANA, 2022). La elección del método depende del caudal disponible, la organización comunal y el tipo de cultivo.

Aplicación del agua en el suelo

Es la etapa final del proceso, donde el agua llega a la parcela y se infiltra en el suelo para ser aprovechada por los cultivos. La forma de aplicación varía según el método de riego empleado: puede ser por gravedad (surcos, melgas), por aspersión (simulando lluvia) o por goteo (directo a la raíz). El objetivo es aplicar el volumen exacto que necesita el cultivo, sin

exceso ni déficit, para evitar pérdidas por escurrimiento o lixiviación de nutrientes (Torres & Salazar, 2019). Esta fase requiere una planificación agronómica adecuada, teniendo en cuenta el tipo de suelo, la evapotranspiración y la fenología del cultivo.

Posible retorno o drenaje hacia la fuente

En algunos sistemas, especialmente los ubicados en cuencas cerradas o con exceso de riego, puede haber un flujo de retorno o drenaje superficial y subterráneo que retorna parte del agua a la fuente original o a otros cuerpos receptores. Este drenaje puede ser natural o conducido mediante canales de retorno. Aunque en muchos casos se considera una pérdida, su adecuada gestión puede contribuir a la recarga de acuíferos o reutilización en otros tramos del sistema (FAO, 2017). En regiones andinas, es importante controlar estos retornos para evitar erosión de suelos o contaminación de fuentes aguas abajo.

3.2.1.5 Eficiencia en sistemas de riego

La eficiencia en un sistema de riego representa el grado en que el agua suministrada cumple su objetivo final: llegar al cultivo en la cantidad, momento y lugar adecuados, con la menor pérdida posible. Según la FAO (2017), el análisis de eficiencia permite evaluar el desempeño hidráulico del sistema y tomar decisiones técnicas para su mejora. La eficiencia no solo está asociada al diseño de la infraestructura, sino también a la operación, el mantenimiento, el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la gestión comunitaria del agua. Para una evaluación completa se consideran distintos tipos de eficiencia, desde la captación hasta la aplicación final.

a) Eficiencia de captación

Se refiere a la relación entre el volumen de agua efectivamente derivado hacia el sistema de riego y el volumen total de agua disponible en la fuente (río, manantial, reservorio). Una captación ineficiente puede deberse a defectos estructurales en la bocatoma, sedimentos que obstruyen el ingreso o pérdidas por fugas al inicio del sistema. Según ANA

(2022), en sistemas comunales de sierra, las eficiencias de captación suelen estar entre 70% y 85%, dependiendo de si existen estructuras de protección, mallas antidesarenado y mantenimiento regular.

EC- 1 *Eficiencia de captación*

$$E = (\text{Volumen derivado} / \text{Volumen disponible}) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

E=Eficiencia de captación (%)

Vderiv= Volumen derivado (m³)

Vdisp= Volumen disponible (m³)

b) Eficiencia de conducción

Esta eficiencia mide la cantidad de agua que llega desde la bocatoma hasta los canales de distribución, considerando pérdidas por infiltración, evaporación y derrames. Es muy sensible al tipo de canal (revestido o no), la longitud, la pendiente y la presencia de fisuras. En canales rústicos sin revestimiento, se pueden perder hasta el 40% del volumen conducido (MIDAGRI, 2020). La eficiencia mejora significativamente con la implementación de revestimientos de concreto, geomembrana o el uso de tuberías cerradas.

EC- 2 *Eficiencia de conducción*

$$E_c = (\text{Volumen entrega} / \text{Volumen en bocatoma}) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

E=Eficiencia de conducción (%)

Ventrega=Volumen en el punto de entrega (m³)

Vbocatoma=Volumen en bocatoma (m³)

c) Eficiencia de distribución

Este parámetro compara el volumen de agua que se entrega finalmente a las parcelas con el volumen que ha sido transportado hasta el sistema de distribución. Pérdidas en esta fase pueden deberse a fugas en ramales, mal uso de compuertas, roturas de tuberías o errores en los turnos de riego. En sistemas organizados, con operación eficiente, esta eficiencia puede superar el 85% (PSI, 2018).

EC- 3 *Eficiencia de distribución*

$$E \text{ distribución} = (\text{Vol. Parcela} / \text{Vol. Conduc}) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

Eficiencia de distribución (%)

Volumen entregado a parcelas (m³)

Volumen conducido (m³)

d) Eficiencia de aplicación

Es uno de los indicadores más importantes. Representa la proporción de agua que realmente queda en la zona radicular de las plantas y es utilizada por el cultivo, frente al volumen entregado a la parcela. Las pérdidas pueden ser por escorrentía superficial, evaporación o infiltración profunda más allá de la raíz. En riego por gravedad sin control, esta eficiencia suele estar entre 40% y 60%, mientras que en riego por goteo puede alcanzar hasta el 95% (FAO, 2017).

EC- 4 *Eficiencia de distribución*

$$E_{ap} = \left(\frac{\text{Agua aprovechada por el cultivo}}{\text{Agua aplicada}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

Eficiencia de aplicación (%)

Agua aprovechada por el cultivo (m³)

Agua aplicada (m³)

e) Eficiencia global del sistema

La eficiencia global representa el producto de todas las eficiencias anteriores. Evalúa el rendimiento integral del sistema desde la captación hasta la aplicación final. Una eficiencia global baja implica que una gran parte del agua se pierde en el proceso, lo cual requiere intervenciones técnicas y de gestión. La eficiencia global es crítica para la sostenibilidad del riego en contextos de escasez hídrica y alta competencia por el recurso.

EC- 5 Eficiencia global

$$E_g = \frac{E_{cap} \times E_{con} \times E_{dis} \times E_{ap}}{100^3} \quad (5)$$

Donde:

Ecap = eficiencia de captación. (%)

Econ = eficiencia de conducción. (%)

Edis = eficiencia de distribución. (%)

Eap = eficiencia de aplicación. (%)

3.2.1.6 Problemáticas comunes en sistemas de riego comunitarios

Los sistemas de riego comunitarios, especialmente en regiones altoandinas como Apurímac, suelen enfrentar múltiples dificultades que afectan tanto la eficiencia hidráulica como la equidad en el acceso al recurso. Estas problemáticas están relacionadas con limitaciones técnicas, estructurales y de gestión comunal. Identificarlas permite proponer mejoras que optimicen el uso del agua y prolonguen la vida útil del sistema (MIDAGRI, 2020).

Pérdidas por infiltración en canales rústicos

Los canales de tierra sin revestimiento presentan una alta permeabilidad, lo que genera infiltración excesiva y pérdidas de agua durante la conducción. En muchos sistemas

rurales, estas pérdidas pueden alcanzar hasta el 40% del volumen total derivado (PSI, 2018). Esta condición se agrava en suelos arenosos o fisurados, y en tramos largos sin mantenimiento. La solución implica el revestimiento parcial o total de canales con concreto, piedra o geomembrana, dependiendo de la disponibilidad de recursos.

Mala nivelación del terreno

Una nivelación deficiente impide que el agua se distribuya de forma uniforme en las parcelas, generando acumulación excesiva en unas áreas y déficit en otras. Esto no solo afecta la producción del cultivo, sino que también incrementa las pérdidas por escorrentía superficial y erosión del suelo (Torres & Salazar, 2019). La nivelación debe realizarse periódicamente utilizando equipos topográficos básicos, como niveles de mano o láser, especialmente en cultivos extensivos bajo riego por gravedad.

Obstrucción por sedimentos, piedras o basura

La acumulación de sedimentos, residuos orgánicos, maleza o basura en los canales representa una de las causas más frecuentes de obstrucción del flujo. Esto reduce el caudal disponible, genera reboses y aumenta el tiempo de entrega. En zonas de fuerte pendiente o lluvias intensas, la erosión también contribuye al acarreo de materiales hacia los canales (ANA, 2022). Es fundamental implementar jornadas periódicas de limpieza y descolmatación, así como estructuras de prefiltrado o desarenado en la bocatoma.

Inequidad en la distribución (conflictos por turnos)

La falta de una gestión clara de los turnos de riego o la ausencia de mecanismos de control fomenta situaciones de inequidad e informalidad en la distribución del agua. Esto puede generar conflictos entre usuarios, sobre todo en épocas de estiaje, afectando la cohesión comunal. En muchos sistemas, la distribución se realiza de forma rotativa, pero sin medidores ni registros, lo que dificulta fiscalizar el cumplimiento de los turnos (MIDAGRI,

2020). Se requiere fortalecer la organización comunal a través de juntas de usuarios, reglamentos internos y fiscalización participativa.

Falta de instrumentos de control (caudalímetros, compuertas)

Muchos sistemas carecen de instrumentos básicos como compuertas de regulación, vertederos medidores, caudalímetros o sistemas de automatización. Esta carencia impide conocer el volumen exacto que se entrega, regular adecuadamente el flujo y detectar pérdidas. Según PSI (2018), más del 70% de los sistemas de riego tradicionales en Perú no cuentan con equipos de control instalados. La implementación de estas herramientas no solo mejora la eficiencia, sino que también fomenta una gestión transparente y técnica del agua, elemento clave para la sostenibilidad del sistema.

3.2.1.7 Diseño técnico e hidráulico de sistemas de riego

El diseño técnico e hidráulico de los sistemas de riego es fundamental para garantizar una distribución eficiente y equitativa del agua en las áreas agrícolas. Este proceso implica la consideración de parámetros técnicos, el uso de herramientas de diseño especializadas y la aplicación de normas técnicas pertinentes.

a) Parámetros técnicos básicos

El diseño de un sistema de riego debe basarse en una serie de parámetros técnicos esenciales que determinan su eficiencia y funcionalidad:

- **Caudal de diseño:** Es la cantidad de agua que debe suministrarse por unidad de tiempo para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Este parámetro se establece considerando la demanda evapotranspirativa, las características del suelo y el tipo de cultivo (Anaya et al., 1997).
- **Coefficiente de uniformidad:** Mide la uniformidad con la que el agua se distribuye en el área de riego. Un coeficiente alto indica una distribución

homogénea, esencial para evitar zonas de sub o sobre riego que puedan afectar el rendimiento de los cultivos (Anaya et al., 1997).

- **Pendiente:** La inclinación del terreno influye en la velocidad de flujo del agua en los canales y tuberías. Pendientes excesivas pueden provocar erosión, mientras que pendientes insuficientes pueden dificultar el movimiento del agua, afectando la eficiencia del sistema (Anaya et al., 1997).
- **Rugosidad:** Se refiere a la resistencia que ofrece la superficie interna de los canales o tuberías al flujo de agua. Materiales con alta rugosidad disminuyen la velocidad del agua y aumentan las pérdidas por fricción, por lo que es crucial seleccionar materiales adecuados para minimizar este efecto (Anaya et al., 1997).

b) Herramientas de diseño

La planificación y diseño de sistemas de riego se apoyan en diversas herramientas y tecnologías que facilitan la toma de decisiones y optimizan el rendimiento del sistema:

Software especializado: Programas como CROPWAT permiten calcular las necesidades de riego basadas en datos climáticos y de cultivo, facilitando la programación eficiente del riego (FAO, 1992).

Sistemas de Información Geográfica (SIG): Herramientas como QGIS permiten analizar y visualizar datos espaciales relacionados con el terreno, facilitando la planificación de la distribución del agua y la identificación de áreas críticas dentro del sistema de riego (FAO, 1992).

c) Normas técnicas aplicables

El diseño y operación de sistemas de riego deben cumplir con normativas técnicas que aseguren su eficiencia y sostenibilidad:

Normativas nacionales e internacionales: Organismos como la FAO han desarrollado manuales y guías técnicas que establecen criterios y estándares para el diseño de sistemas de riego, promoviendo prácticas sostenibles y eficientes en la gestión del agua (FAO, 1992).

3.2.1.8 Gestión del sistema de riego

La gestión de un sistema de riego, especialmente en el contexto comunal rural, implica la articulación entre la organización social, el mantenimiento técnico y la planificación con actores institucionales. La sostenibilidad del riego no solo depende del diseño físico de la infraestructura, sino también de cómo se administra el recurso, se organizan los usuarios y se responde a los cambios en la oferta y demanda de agua (ANA, 2022). A continuación, se analizan los tres ejes claves de esta gestión.

a) Organización comunal

En el Perú, la estructura básica para la gestión comunal del agua de riego está constituida por las Juntas de Usuarios de Agua (JUA) y sus respectivos Comités de Riego. Estas organizaciones tienen como funciones principales: asignar turnos de riego, mantener la infraestructura, mediar en conflictos, cobrar tarifas de operación y representar a los usuarios ante entidades externas (MIDAGRI, 2020). Además, existen fiscalizadores de agua que supervisan el uso correcto del recurso por parte de cada agricultor, garantizando la equidad y cumplimiento de los turnos establecidos. Según datos de la ANA (2021), existen más de 120 Juntas de Usuarios registradas en el país, con cobertura en más de 1.7 millones de hectáreas agrícolas. La fortaleza de esta organización comunal incide directamente en el nivel de eficiencia y equidad del sistema.

b) Mantenimiento y operación

El mantenimiento periódico es esencial para prolongar la vida útil de un sistema de riego. Las actividades básicas incluyen la limpieza de canales, retiro de sedimentos (descolmatación), reparación de muros o compuertas, y control de vegetación invasiva. En

sistemas comunitarios, estas tareas suelen realizarse mediante faenas comunales programadas de manera mensual o estacional, especialmente antes del inicio de campañas agrícolas (PSI, 2018). Un cronograma de mantenimiento debidamente planificado y socializado evita obstrucciones, pérdidas por filtración y colapsos en la infraestructura. Además, se recomienda llevar registros técnicos de las intervenciones realizadas y mantener inventarios actualizados de estructuras y materiales de reposición (MIDAGRI, 2020).

c) Gestión integrada del recurso hídrico

La gestión de sistemas de riego debe alinearse con una visión de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), promovida por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Esto implica coordinar con gobiernos locales, programas de desarrollo rural (como FONCODES, PSI, Agroideas), y otras instituciones públicas y privadas para asegurar un manejo multisectorial, sostenible y participativo del agua (ANA, 2022). Por ejemplo, las municipalidades pueden contribuir con financiamiento para mantenimiento, proyectos de tecnificación, o capacitación a usuarios. Asimismo, los planes de gestión de cuenca permiten articular el uso agrícola del agua con otros usos (doméstico, industrial, ambiental), previniendo conflictos y asegurando el equilibrio hídrico (FAO, 2017).

3.2.1.9 Innovación y tecnificación del riego

La modernización de los sistemas de riego es una necesidad creciente frente a la escasez hídrica, el cambio climático y la necesidad de aumentar la productividad agrícola. Las innovaciones tecnológicas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua, automatizar procesos operativos y monitorear en tiempo real las condiciones del cultivo y del suelo (FAO, 2020). En contextos rurales como Apurímac, donde muchos sistemas siguen siendo tradicionales, la introducción progresiva de tecnologías puede marcar la diferencia en el rendimiento y sostenibilidad.

Automatización de compuertas

La automatización de compuertas consiste en instalar dispositivos que permiten abrir y cerrar el flujo de agua de manera remota o programada. Estos sistemas se controlan mediante actuadores eléctricos o hidráulicos, y pueden estar integrados con sensores de nivel o volumen. Su uso reduce significativamente la pérdida de agua por desbordes o aperturas manuales imprecisas y mejora la distribución equitativa (MIDAGRI, 2021). En algunos proyectos piloto en el sur del Perú, la automatización ha logrado incrementar la eficiencia de distribución en más de un 20%, especialmente en sistemas colectivos (PSI, 2020).

Control de humedad por sensores

El uso de sensores de humedad de suelo permite determinar con precisión el momento óptimo para aplicar el riego. Estos dispositivos se colocan en el perfil del suelo y envían información en tiempo real sobre el contenido de humedad, ayudando a evitar el riego excesivo o deficiente. Además, se pueden integrar con sistemas de riego por goteo o aspersión automatizada. Su uso ha demostrado reducir el consumo de agua entre un 30% y 40%, sin afectar el rendimiento de cultivos como hortalizas, frutales y pastos (Netafim, 2022). En zonas rurales, pueden implementarse versiones simplificadas, de bajo costo, adaptadas a pequeños agricultores.

Implementación de paneles solares para riego tecnificado

Una tendencia creciente en la tecnificación rural es el uso de paneles solares fotovoltaicos para generar energía en sistemas de riego presurizados, como bombeo solar o control de válvulas. Esta tecnología es especialmente útil en zonas aisladas sin acceso a energía eléctrica convencional. Los paneles solares reducen los costos operativos y permiten el uso continuo del riego tecnificado, incluso en comunidades alejadas. En proyectos desarrollados en Cusco y Arequipa, se ha logrado una reducción del 60% en los costos energéticos de riego mediante el uso de energía solar (GIZ, 2020).

Sistemas de monitoreo satelital para cultivos

Los sistemas de monitoreo satelital e imágenes de drones permiten observar el estado de los cultivos, el nivel de estrés hídrico y la uniformidad del riego a escala parcelaria. Estas herramientas, como Sentinel-2 o Landsat 8, generan índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que indican la salud del cultivo. Al integrarse con datos meteorológicos y sensores de suelo, se puede tomar decisiones más informadas para el riego, fertilización y cosecha (Martínez et al., 2022). Estas tecnologías están siendo usadas progresivamente en zonas de agroexportación y ya comienzan a probarse en proyectos de pequeña agricultura bajo programas de desarrollo rural.

3.2.1.10 Marco normativo e institucional

El funcionamiento, gestión y sostenibilidad de los sistemas de riego en el Perú están enmarcados por un conjunto de normas y políticas públicas que regulan el uso del agua, los derechos de los usuarios y las responsabilidades institucionales. Este marco normativo busca garantizar la gestión integrada del recurso hídrico, promoviendo su uso eficiente, equitativo y sostenible. A continuación, se detallan los instrumentos más relevantes que rigen los sistemas de riego en el ámbito nacional.

Ley de Recursos Hídricos N.º 29338

La Ley de Recursos Hídricos N.º 29338, promulgada en el año 2009, establece el marco legal para la gestión, conservación, protección y uso sostenible del agua en el país. Esta ley declara al agua como un bien de dominio público, inalienable e imprescriptible, administrado por el Estado en beneficio de toda la población. En lo referente al riego agrícola, reconoce el derecho de los usuarios organizados en juntas, comisiones y comités, y promueve la participación de la sociedad civil en la toma de decisiones (Congreso de la República del Perú, 2009). Además, exige que toda actividad de aprovechamiento del agua cuente con una licencia o permiso otorgado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), institución encargada de su administración.

Reglamento de Organizaciones de Usuarios de Agua (ROUA)

El Reglamento de Organizaciones de Usuarios de Agua (ROUA) establece las normas y procedimientos para el funcionamiento de las juntas, comisiones y comités de usuarios de agua en el Perú. Define su estructura, funciones, mecanismos de elección, atribuciones y obligaciones. Estas organizaciones tienen el rol de operar y mantener los sistemas hidráulicos, distribuir equitativamente el recurso, recaudar tarifas y representar a sus miembros ante las autoridades (ANA, 2015). El reglamento también promueve la transparencia en la gestión, la rendición de cuentas y el uso de herramientas técnicas para mejorar la eficiencia en la distribución del agua.

Planes de gestión de cuenca de la ANA

Los Planes de Gestión de Recursos Hídricos por Cuenca son instrumentos técnicos y de planificación elaborados por la Autoridad Nacional del Agua para promover la gestión integrada del recurso hídrico a nivel de cada unidad hidrográfica. Estos planes identifican los problemas hídricos de la cuenca, formulan objetivos estratégicos y establecen acciones para el aprovechamiento sostenible del agua, considerando las demandas de los sectores agrícola, urbano, industrial y ambiental (ANA, 2022). En el caso de la región Apurímac, el Plan de Gestión de la Cuenca del río Pachachaca-Mariño establece lineamientos específicos para el uso racional del agua en riego, la implementación de infraestructura verde, la protección de fuentes hídricas y el fortalecimiento de capacidades en las Juntas de Usuarios.

3.2.2 Desempeño hidráulico.

3.2.2.1 Concepto

El aprovechamiento hídrico es un concepto que alude a la capacidad de uso racional, eficiente y oportuno del recurso agua, considerando tanto su volumen disponible como su aplicación efectiva para un fin determinado. En contextos agrícolas, este término hace referencia a cómo se utiliza el agua dentro de un sistema de riego, no solo desde la

perspectiva de su consumo, sino desde su captación, transporte, distribución, aplicación y retorno (FAO, 2017). Evaluar el aprovechamiento hídrico implica analizar la relación entre el agua disponible y la cantidad que realmente es aprovechada por el cultivo, con un enfoque técnico, ambiental y social.

Definición general del aprovechamiento hídrico

Desde un enfoque general, el aprovechamiento hídrico se define como el grado de utilización efectiva del agua disponible en función de una necesidad específica, buscando maximizar el beneficio por unidad de agua utilizada. No se limita únicamente al uso físico del recurso, sino que también considera aspectos de eficiencia, oportunidad, sostenibilidad y equidad (ANA, 2022). Un buen aprovechamiento implica minimizar pérdidas por evaporación, filtraciones o escurrimiento, además de adecuar la entrega del agua a los requerimientos reales del usuario o del sistema productivo.

Enfoque aplicado a sistemas de riego agrícola

En los sistemas de riego, el aprovechamiento hídrico se traduce en cómo el agua disponible es transformada en productividad agrícola, en términos de cantidad de producto generado por metro cúbico de agua. En este enfoque, se consideran las condiciones del canal de conducción, la infraestructura de distribución, el método de riego (gravedad, aspersión, goteo), y la eficiencia en cada etapa del sistema. Según estudios de MIDAGRI (2021), muchos sistemas de riego comunal en la sierra peruana operan con eficiencias globales menores al 40%, lo que refleja un bajo nivel de aprovechamiento. Por tanto, su evaluación técnica es necesaria para diseñar estrategias de mejora, especialmente en zonas de cuenca media como el proyecto Mariño.

Diferencias entre uso, consumo y aprovechamiento del agua

Aunque suelen utilizarse como sinónimos, existen diferencias técnicas entre estos conceptos:

- **Uso del agua:** Se refiere a cualquier acción que involucre el aprovechamiento del recurso, ya sea para riego, consumo humano, industria, energía, etc. No necesariamente implica alteración del volumen original.
- **Consumo del agua:** Es la parte del uso que implica la desaparición del recurso del sistema natural (por ejemplo, por evapotranspiración o infiltración profunda), sin retorno a la fuente.
- **Aprovechamiento del agua:** Implica una evaluación de la efectividad del uso, considerando cuánto del agua disponible se utilizó adecuadamente, en función del objetivo para el cual fue asignada.

En riego agrícola, el aprovechamiento está más estrechamente ligado al concepto de eficiencia y productividad, siendo un indicador clave para la sostenibilidad de los sistemas hídricos rurales (FAO, 2017).

3.2.2.2 Importancia del aprovechamiento hídrico en sistemas de riego

El aprovechamiento hídrico representa el grado en que el agua disponible en un sistema de riego es utilizada de forma efectiva y oportuna por los usuarios agrícolas, con el mínimo de pérdidas posibles. En el contexto de sistemas rurales ubicados en cuencas medias, como el del proyecto Mariño en Abancay, esta evaluación se convierte en una herramienta crucial para entender el desempeño del sistema, identificar debilidades en la infraestructura o en la gestión comunal, y formular estrategias para la sostenibilidad del recurso (ANA, 2022). La importancia del aprovechamiento hídrico radica en su capacidad para relacionar técnica, territorio y gobernanza del agua, asegurando la resiliencia del sistema frente a escenarios de escasez, conflictos por uso y pérdida de productividad agrícola.

Seguridad hídrica para la producción agrícola

Una gestión adecuada del aprovechamiento hídrico permite garantizar la continuidad del suministro durante todo el ciclo del cultivo, evitando interrupciones que puedan generar

estrés hídrico o afectar la productividad. Esta seguridad hídrica es fundamental en zonas rurales donde no existen fuentes alternas y donde la producción agrícola depende casi exclusivamente del riego. Según la FAO (2020), en sistemas evaluados con eficiencia de aplicación superior al 60%, los rendimientos agrícolas se incrementaron entre un 20% y 30%, comparados con aquellos con bajo control del recurso.

Optimización del recurso en cuencas medias

En cuencas intermedias, como la del río Mariño, el agua es limitada y suele estar en disputa entre diferentes comunidades y sectores. Por ello, la evaluación del aprovechamiento hídrico permite detectar ineficiencias estructurales (como pérdidas por infiltración o fugas), y proponer mejoras que favorezcan la equidad y el acceso sostenido al agua. Un sistema optimizado reduce desperdicios y maximiza el beneficio por cada litro de agua derivado. Estudios de la ANA (2022) señalan que la tecnificación parcial en cuencas medias puede aumentar hasta en un 35% el volumen de agua disponible sin necesidad de nuevas fuentes.

Reducción del estrés hídrico en zonas rurales

El mal aprovechamiento hídrico agudiza el estrés hídrico, tanto a nivel del cultivo como del sistema social. Las pérdidas en conducción o la mala programación de turnos generan conflictos entre usuarios y disminuyen la confiabilidad del sistema. Evaluar este aprovechamiento permite introducir mejoras en la asignación del recurso, evitar desperdicios y reducir tensiones en contextos de escasez. Según MIDAGRI (2021), la implementación de sistemas de evaluación hídrica y control de caudales ha reducido hasta en un 40% los conflictos internos en comunidades con juntas de usuarios organizadas.

3.2.2.3 Criterios técnicos de evaluación del aprovechamiento hídrico

La evaluación del aprovechamiento hídrico en sistemas de riego requiere de criterios técnicos que permitan analizar de forma objetiva cómo se utiliza el agua desde su captación hasta su aplicación en parcela. Esta evaluación no solo busca determinar la eficiencia del

sistema, sino también identificar los puntos críticos donde se pierden volúmenes de agua o se aplican de forma inadecuada. En sistemas de cuenca media como el del proyecto Mariño en Abancay, estos criterios técnicos permiten diseñar mejoras específicas que optimicen el uso del recurso hídrico en beneficio de los productores agrícolas (ANA, 2022).

Balance hídrico en sistemas de riego (entrada-salida)

El balance hídrico es un criterio fundamental que compara el volumen total de agua disponible en el sistema (captado o almacenado) con el volumen efectivamente utilizado en el riego. Se expresa como una ecuación:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Almacenamiento} \pm \text{Pérdidas}$$

Este análisis permite cuantificar pérdidas por infiltración, evaporación o escurrimiento, y ayuda a planificar la dotación necesaria por usuario. En contextos rurales, este balance puede realizarse mediante aforos simples en bocatomas, canales y puntos de entrega a parcela (FAO, 2017).

Demanda vs disponibilidad hídrica

La demanda hídrica corresponde al volumen de agua requerido por los cultivos en función de su etapa fenológica, el clima y el tipo de suelo. La disponibilidad hídrica, en cambio, es el volumen real que puede ser captado de la fuente. Comparar ambos datos permite determinar si el sistema de riego está en equilibrio, en déficit o en excedente. En muchos sistemas tradicionales, la demanda supera la disponibilidad durante la época seca, lo que evidencia la necesidad de reprogramar turnos o mejorar la infraestructura (MIDAGRI, 2021).

Eficiencia en cada etapa del sistema (captación, conducción, distribución, aplicación)

La evaluación debe considerar la eficiencia técnica en cada una de las etapas del sistema:

- **Eficiencia de captación:** Relación entre el volumen de agua captado y el volumen disponible en la fuente.
- **Eficiencia de conducción:** Porcentaje de agua que llega desde la bocatoma hasta los canales secundarios, considerando pérdidas por filtración.
- **Eficiencia de distribución:** Volumen que llega a las parcelas frente al que salió del canal principal.
- **Eficiencia de aplicación:** Cantidad de agua que queda efectivamente en el suelo para uso del cultivo.

La multiplicación de estas eficiencias determina la eficiencia global del sistema, que en sistemas no tecnificados puede ser menor al 40% (PSI, 2018). Esta eficiencia global es uno de los indicadores más usados para evaluar el aprovechamiento hídrico.

3.2.2.4 Indicadores de evaluación del aprovechamiento hídrico

Los indicadores de evaluación del aprovechamiento hídrico permiten cuantificar el nivel de eficiencia y efectividad en el uso del agua dentro de un sistema de riego. Estos indicadores no solo brindan una base técnica para diagnosticar el estado actual del sistema, sino que también permiten comparar el rendimiento entre diferentes unidades productivas, temporadas o tipos de cultivo. En sistemas comunales como el del proyecto Mariño en Abancay, aplicar estos indicadores es esencial para optimizar la gestión del recurso hídrico, priorizar inversiones y diseñar estrategias de intervención (ANA, 2022).

Índice de eficiencia de aplicación del agua

Este indicador mide el porcentaje de agua que, una vez entregada a la parcela, realmente permanece en la zona radicular del cultivo y es aprovechada por la planta. Su fórmula es:

$$EC- 6 \text{ Eficiencia de aplicación de agua}$$

$$E_a = \left(\frac{\text{Volumen útil}}{\text{Volumen aplicado}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Donde:

E_a = Eficiencia de aplicación (%)

Vol útil= Volumen de agua efectivamente aprovechado por el cultivo (m^3)

Vol aplicado= Volumen total de agua aplicada al terreno (m^3)

Un sistema con riego por gravedad sin nivelación puede tener eficiencias menores al 50%, mientras que un sistema tecnificado por goteo puede superar el 90% (FAO, 2017). Este indicador es clave para identificar pérdidas por escurrimiento superficial, evaporación o percolación profunda.

Índice de rendimiento hídrico (kg/m^3)

Mide la productividad por unidad de agua utilizada. Se calcula dividiendo la producción obtenida (en kilogramos) entre el volumen total de agua aplicada (en metros cúbicos). Su fórmula es:

$$IRH = \text{Producción total (kg)} / \text{Volumen de agua (m}^3\text{)}$$

Este índice permite comparar el desempeño de distintas parcelas o sistemas. En cultivos como maíz o papa, valores entre 1.2 y 1.6 kg/m^3 son considerados adecuados en sistemas tradicionales (MIDAGRI, 2021).

Coefficiente de uniformidad de riego

Este coeficiente permite evaluar qué tan uniformemente se distribuye el agua dentro de una parcela. Se calcula en base a muestreos de humedad o volúmenes aplicados en distintos puntos de la parcela. Un coeficiente mayor a 85% indica buena distribución; valores bajos muestran deficiencias en el método de aplicación o en la nivelación del terreno (PSI, 2018).

Relación volumen requerido / volumen aplicado

Este indicador permite evaluar la eficiencia global a nivel del sistema y del cultivo.

Se calcula como:

$$VR/VA = \text{Volumen requerido por el cultivo} / \text{Volumen total aplicado}$$

Un valor cercano a 1 indica un alto grado de adecuación del riego. Valores mayores a 1 revelan exceso de agua (desperdicio), mientras que valores menores a 1 evidencian déficit hídrico. En evaluaciones de campo realizadas por ANA (2022), muchos sistemas de riego comunal operan con relaciones entre 1.3 y 1.6, lo que evidencia riego excesivo.

3.2.2.5 Metodologías de evaluación del aprovechamiento hídrico

La evaluación del aprovechamiento hídrico se basa en un conjunto de métodos cuantitativos y cualitativos que permiten identificar el grado de eficiencia y efectividad en el uso del agua en sistemas de riego. Estas metodologías permiten cuantificar caudales, estimar pérdidas, conocer el comportamiento hídrico del cultivo y mejorar la planificación del riego. Su aplicación es fundamental en zonas como la cuenca media del proyecto Mariño, donde múltiples factores naturales y sociales influyen en la disponibilidad y uso del agua (Nieto et al., 2023).

Medición de caudales y volúmenes en campo (aforos, vertederos)

La medición directa de caudales es uno de los métodos más utilizados para conocer cuánta agua fluye por un canal en un momento determinado. Se aplican métodos como:

- Vertederos tipo Parshall, Cipolletti y Thomson, que permiten determinar el caudal en función del nivel del agua (ANA, 2022).
- Método del flotador, apropiado para sistemas rústicos donde se puede estimar la velocidad superficial del flujo.
- Método volumétrico, aplicado para medir el volumen en depósitos o canales cerrados.

Estas técnicas son claves para calcular la eficiencia de captación, conducción y distribución, y forman parte del monitoreo estándar en evaluaciones comunales (López Medina et al., 2024).

Cálculo de lámina neta y lámina bruta de riego

Otra metodología clave es el cálculo de las láminas de riego, las cuales determinan cuánto volumen de agua se necesita para cubrir la demanda de un cultivo:

- **Lámina neta de riego (LNR):** volumen requerido por el cultivo sin considerar pérdidas.
- **Lámina bruta de riego (LBR):** volumen total que debe aplicarse considerando pérdidas en conducción y aplicación.

Su relación está dada por:

$$LBR = LNR / \text{eficiencia global del sistema}$$

Esta metodología permite estimar la dotación por hectárea y programar el riego según los requerimientos agronómicos del cultivo (Nieto et al., 2023).

Uso de herramientas como CROPWAT, AquaCrop, Excel técnico

Los modelos de simulación permiten estimar consumos, evaluar escenarios y mejorar la toma de decisiones:

- **CROPWAT (FAO):** permite calcular la evapotranspiración, necesidades hídricas y eficiencias.
- **AquaCrop:** simula la respuesta del cultivo al agua en diferentes condiciones de manejo.
- **Hojas de cálculo en Excel** son utilizadas en campo para evaluar balances, registrar aforos y calcular indicadores como eficiencia de aplicación, distribución o rendimiento hídrico (Palerm Viqueira, 2019).

Estas herramientas se aplican en proyectos de riego tecnificado y evaluaciones comunales como base para toma de decisiones.

Métodos indirectos (encuestas, percepción de usuarios)

En zonas rurales donde los datos instrumentales son escasos, se recurre a métodos participativos como:

- Encuestas estructuradas y entrevistas a regantes, donde se indaga sobre turnos, percepción de eficiencia, conflictos, etc.
- Registros comunales de turnos y volúmenes entregados.
- Mapeo social del sistema, útil para identificar puntos críticos de pérdida o falta de acceso.

Estos métodos son complementarios a la medición técnica y permiten una evaluación integral del sistema desde la perspectiva del usuario (Palerm Viqueira, 2019).

3.2.2.6 Factores que condicionan el aprovechamiento hídrico en cuencas medias

El aprovechamiento hídrico en sistemas de riego localizados en cuencas medias depende de múltiples factores físicos, climáticos, técnicos y sociales. Evaluar estos factores permite entender por qué en determinados sistemas comunales el agua no se aprovecha eficientemente, generando pérdidas, baja productividad o conflictos. En regiones como Abancay, estas condiciones son críticas debido a la variabilidad climática, la topografía compleja y las prácticas tradicionales de riego (Nieto et al., 2023).

Factores climáticos y estacionales

Las variables climáticas como precipitación, temperatura y radiación solar determinan tanto la disponibilidad hídrica como la demanda de los cultivos. En zonas andinas, la marcada estacionalidad genera un desequilibrio entre oferta y demanda: en época seca (mayo a septiembre), los caudales pueden reducirse en más del 60%, afectando directamente el abastecimiento para riego (ANA, 2022). Además, el incremento de la

temperatura aumenta la evapotranspiración, incrementando la demanda de agua del cultivo (FAO, 2020). Estos cambios requieren una programación hídrica ajustada a las condiciones meteorológicas y fenológicas.

Tipo de suelo y capacidad de retención de humedad

El tipo de suelo influye directamente en la capacidad de almacenamiento de agua útil, en la velocidad de infiltración y en la frecuencia de riego requerida. Los suelos arenosos tienen baja retención y alta percolación, lo que reduce el tiempo disponible para que las raíces absorban el agua. Por el contrario, los suelos francos o arcillosos retienen mayor humedad, aunque pueden presentar problemas de escorrentía superficial si no se manejan adecuadamente (López Medina et al., 2024). No considerar las propiedades edáficas conduce a sobrierigos o riegos deficitarios, disminuyendo el aprovechamiento real del agua.

Tecnología de riego utilizada

El tipo de sistema de riego determina el nivel de eficiencia en conducción, distribución y aplicación. En sistemas por gravedad sin revestimiento ni nivelación, las pérdidas por infiltración y escorrentía pueden superar el 50% del volumen conducido. En contraste, el riego tecnificado (aspersión, goteo) puede alcanzar eficiencias globales superiores al 85% si es bien operado (FAO, 2020). Sin embargo, en cuencas medias del Perú, más del 70% de los sistemas siguen siendo tradicionales y con infraestructura deteriorada, según reportes de ANA (2022). Esto limita seriamente la capacidad de aprovechamiento hídrico.

Gestión comunal del agua

La eficiencia del sistema también depende de la organización social y comunal. Juntas de usuarios sin estatutos claros, sin fiscalización o sin mantenimiento de infraestructura suelen presentar mayores pérdidas, conflictos por turnos y baja eficiencia de aplicación (Palerm Viqueira, 2019). En cambio, comunidades con estructuras organizadas,

cronogramas de limpieza, capacitación técnica y mecanismos de medición pueden aumentar su eficiencia en más de un 25% respecto a comunidades desorganizadas (MIDAGRI, 2021). La gestión colectiva del agua es, por tanto, un factor determinante en el nivel de aprovechamiento.

3.2.2.7 Problemáticas comunes del bajo aprovechamiento hídrico

El bajo aprovechamiento hídrico en sistemas de riego comunales, especialmente en zonas de cuenca media como el proyecto Mariño, se debe a una combinación de deficiencias estructurales, operativas y de gestión. Estas problemáticas afectan la eficiencia global del sistema y tienen consecuencias directas en la productividad agrícola, el acceso equitativo al recurso y la sostenibilidad hídrica. Identificarlas es fundamental para formular propuestas de mejora que optimicen el uso del agua, reduzcan las pérdidas y promuevan un manejo más racional y justo (ANA, 2022).

Pérdidas en conducción y distribución

Una de las causas más frecuentes del bajo aprovechamiento hídrico son las pérdidas en los canales de conducción y distribución, generadas por filtraciones en canales de tierra, fisuras en estructuras, y falta de revestimiento. Según estudios del MIDAGRI (2021), en canales rústicos no revestidos se puede perder hasta el 40% del volumen derivado, lo que limita el volumen que llega efectivamente a las parcelas. La inexistencia de obras de control y el deterioro de la infraestructura incrementan esta ineficiencia.

Falta de control y medición de volúmenes

En muchos sistemas comunales no existen instrumentos de medición como caudalímetros, vertederos o compuertas reguladoras, lo que impide conocer con precisión cuánta agua se deriva, distribuye y aplica. Esta ausencia de control técnico genera entregas arbitrarias, excesos en algunas parcelas y déficit en otras. La FAO (2020) recomienda como

estrategia básica la instalación de dispositivos de medición en bocatomas y principales derivaciones para garantizar transparencia, equidad y eficiencia.

Riego no tecnificado o no programado

El uso predominante del riego por gravedad sin nivelación del terreno conduce a aplicaciones excesivas o desiguales, lo que reduce la eficiencia de aplicación y genera escurrimiento superficial. Además, muchos agricultores no utilizan métodos de programación del riego basados en la demanda real del cultivo, sino que riegan por costumbre o turno. Según López Medina et al. (2024), la falta de tecnificación puede reducir la eficiencia de aplicación hasta un 30%, afectando la absorción hídrica y el rendimiento del cultivo.

Mala organización o débil gestión comunal

La inexistencia de normas internas, turnos desorganizados y conflictos entre usuarios también afecta negativamente el aprovechamiento hídrico. En muchos casos, no se cumplen las faenas de mantenimiento, no se fiscaliza el uso del agua, o los recursos económicos recaudados no se reinvierten en la mejora del sistema. Según Palerm Viqueira (2019), los sistemas que no cuentan con liderazgo claro, reglamentos de agua y participación comunitaria activa, presentan niveles de eficiencia significativamente más bajos que los sistemas gestionados colectivamente de forma técnica.

3.2.2.8 Estrategias para mejorar el aprovechamiento hídrico en riego comunal

Mejorar el aprovechamiento hídrico en sistemas de riego comunales implica implementar una serie de estrategias integradas que combinen infraestructura adecuada, fortalecimiento organizacional, uso de tecnología apropiada y gestión participativa. En cuencas medias como la del río Mariño, donde la oferta hídrica es compartida y limitada, estas estrategias deben adaptarse a las condiciones agroclimáticas, culturales y económicas

de las comunidades. A continuación, se describen las principales líneas de acción para lograr una mayor eficiencia en el uso del recurso (ANA, 2022; MIDAGRI, 2021).

Mejora en la infraestructura hidráulica

Una de las acciones más efectivas es la rehabilitación o revestimiento de canales de conducción y distribución, lo cual reduce significativamente las pérdidas por infiltración. Asimismo, se debe incorporar estructuras hidráulicas como compuertas de regulación, vertederos medidores y cámaras de inspección, que permiten controlar y monitorear el flujo. Según estudios del PSI (2020), estas mejoras pueden incrementar la eficiencia global del sistema hasta en un 35% en comunidades altoandinas con riego por gravedad.

Capacitación a usuarios y fortalecimiento de la gestión comunal

La formación técnica de los usuarios sobre el manejo del agua, la programación del riego, la operación de compuertas y la lectura de instrumentos de medición es esencial para un uso eficiente del recurso. Además, se requiere fortalecer las juntas y comités de usuarios, promoviendo la elaboración de reglamentos internos, cronogramas de mantenimiento y sistemas de fiscalización. La FAO (2020) destaca que los sistemas donde los usuarios están capacitados logran una mejora sostenida en la eficiencia de aplicación y reducen conflictos por turnos hasta en un 50%.

Implementación de tecnologías de monitoreo y control

El uso de tecnologías de bajo costo, como sensores de humedad, medidores portátiles de caudal y aplicativos móviles para registrar el uso del agua, permite tomar decisiones más informadas. También se pueden emplear herramientas como CROPWAT o AquaCrop para programar el riego en función de la evapotranspiración y las necesidades hídricas específicas del cultivo. Estas tecnologías pueden ser introducidas de manera gradual, con apoyo técnico, en comunidades que aún no cuentan con tecnificación total (López Medina et al., 2024).

Sostenibilidad y resiliencia hídrica

Finalmente, las estrategias deben promover la sostenibilidad del sistema a largo plazo, incorporando prácticas de conservación del agua como la cosecha de agua de lluvia, el mantenimiento de áreas de recarga hídrica y la reforestación de microcuencas. Asimismo, es fundamental que la comunidad esté preparada para enfrentar eventos extremos como sequías o reducción estacional de caudales, mediante planes de contingencia y manejo adaptativo del recurso (Palerm Viqueira, 2019). En este sentido, la evaluación periódica del sistema es una herramienta vital para mantener su resiliencia.

3.2.2.9 Rol de la evaluación hídrica en la planificación de cuencas

La evaluación del aprovechamiento hídrico no solo es una herramienta para diagnosticar la eficiencia del uso del agua en un sistema de riego, sino que cumple un rol estratégico en la planificación integral de la gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca. En territorios como la cuenca del río Mariño, donde el agua es compartida por múltiples actores (agricultores, poblaciones urbanas, ecosistemas), la planificación debe basarse en datos reales sobre oferta, demanda, eficiencia y conflictos, y para ello, la evaluación hídrica es el insumo principal (ANA, 2022).

La evaluación como insumo para planes de gestión

Las evaluaciones periódicas del uso del agua en riego, mediante indicadores técnicos y herramientas de medición, permiten identificar brechas entre la disponibilidad y la demanda. Estos datos son fundamentales para la elaboración de Planes de Gestión de Recursos Hídricos por Cuenca, los cuales orientan la distribución del recurso, las inversiones en infraestructura, las zonas prioritarias para intervención y las políticas de conservación (FAO, 2020). Sin una evaluación técnica adecuada, las decisiones pueden estar basadas en percepciones subjetivas, generando desequilibrios en la asignación del agua.

Enlace con políticas públicas y sostenibilidad hídrica

La información generada por las evaluaciones permite articular los sistemas de riego comunales con programas nacionales como el Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI) o el Plan Nacional de Recursos Hídricos, orientados a mejorar la eficiencia del riego a nivel país. Además, contribuye a cumplir con los objetivos de sostenibilidad del agua establecidos por la Ley de Recursos Hídricos N.º 29338 y con compromisos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento (MIDAGRI, 2021).

Participación comunitaria y toma de decisiones informadas

La evaluación del aprovechamiento hídrico participativa, con involucramiento de las juntas de usuarios, promueve una mejor gobernanza del agua. Permite que los agricultores comprendan cuánta agua consumen realmente, dónde ocurren las pérdidas, y cómo se puede mejorar el sistema. Esto facilita procesos de toma de decisiones más justos, técnicos y consensuados. Según Palerm Viqueira (2019), la incorporación de los usuarios en el monitoreo y la evaluación de sus propios sistemas fortalece la corresponsabilidad en la gestión del recurso.

3.3 Definición de términos

Aprovechamiento hídrico: Se refiere al grado en que el agua disponible en un sistema de riego es utilizada eficientemente para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Este concepto implica evaluar cuánta del agua derivada desde la fuente es efectivamente empleada en la zona radicular de las plantas, considerando las pérdidas por conducción, distribución y aplicación. En el contexto del sistema de riego Mariño, el aprovechamiento hídrico es una medida crítica para garantizar la sostenibilidad agrícola en la cuenca media, donde los recursos son limitados y compartidos entre comunidades (FAO, 2020).

Cuenca hidrográfica Unidad: Territorial delimitada por divisorias topográficas, donde todas las aguas superficiales convergen hacia un punto común. En planificación hídrica, la cuenca constituye la unidad fundamental para gestionar de forma integrada la oferta y demanda del recurso, como sucede en el caso del río Mariño (ANA, 2022).

Caudal Volumen: De agua que circula por una sección transversal de canal por unidad de tiempo, generalmente expresado en litros por segundo (L/s). Este parámetro es fundamental para dimensionar canales, programar riegos y hacer evaluaciones de balance hídrico (ANA, 2022).

Eficiencia de aplicación: Porcentaje del agua aplicada en la parcela que es efectivamente utilizada por el cultivo y queda almacenada en la zona radicular. Es un indicador clave para determinar el grado de aprovechamiento real del agua durante el riego (PSI, 2020).

Lámina neta de riego (LNR): Cantidad de agua requerida por el cultivo en un determinado período de tiempo, sin considerar pérdidas. Depende de factores como la evapotranspiración del cultivo, la precipitación efectiva y la capacidad de retención del suelo (FAO, 2017).

Lámina bruta de riego (LBR): Volumen total de agua que se debe aplicar para cubrir la LNR, considerando las pérdidas por conducción y aplicación. Se calcula mediante la fórmula: $LBR = LNR / \text{eficiencia global del sistema}$ (MIDAGRI, 2021).

Aforo: Técnica de medición de caudales utilizada para determinar el volumen de agua que circula en un canal o cauce. Puede realizarse mediante métodos directos (volumétrico, flotador) o indirectos (vertederos calibrados) (ANA, 2022).

Gestión comunal del agua: Conjunto de actividades organizadas por los usuarios para operar, mantener y distribuir el recurso hídrico de forma equitativa dentro de un sistema

comunal. Incluye la planificación de turnos, cobranza de cuotas, mantenimiento de infraestructura y resolución de conflictos (Palerm Viqueira, 2019).

Tecnificación del riego: Proceso de modernización del riego mediante el uso de tecnologías como el riego por goteo, aspersión, sensores de humedad y automatización, que permiten aplicar el agua de forma precisa, oportuna y eficiente (FAO, 2020).

Turno de riego: Asignación horaria o temporal del uso del agua para cada usuario dentro de un sistema comunal. Su programación busca asegurar el acceso equitativo y evitar conflictos entre agricultores (MIDAGRI, 2021).

Evapotranspiración (ETc): Suma de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas. Es uno de los principales parámetros para estimar las necesidades hídricas del cultivo y planificar el riego (FAO, 2020).

Coefficiente de uniformidad: Indicador que mide qué tan uniforme es la distribución del agua en la parcela durante el riego. Valores bajos reflejan mala nivelación o problemas en el método de aplicación (PSI, 2020).

Infraestructura de riego: Conjunto de estructuras que integran el sistema de riego: bocatomas, canales, estructuras de control y distribución, compuertas, medidores, entre otros. Su buen estado es clave para lograr una alta eficiencia hidráulica (ANA, 2022).

Sostenibilidad hídrica: Capacidad de una comunidad o sistema para mantener el uso del recurso agua en el tiempo, garantizando su disponibilidad para las futuras generaciones sin afectar los ecosistemas (FAO, 2020).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación aplicada consiste en la utilización sistemática de teorías, métodos y técnicas para resolver problemas concretos, generando conocimiento útil para la toma de decisiones y la mejora de procesos existentes (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Este tipo de estudio se caracteriza por su orientación práctica y su énfasis en la aplicación directa de resultados científicos al contexto de estudio.

En la presente tesis se empleó un enfoque de investigación aplicada, dado que los resultados obtenidos de los cálculos hidráulicos y de la simulación en SWMM 5.2 se dirigieron a optimizar y validar el desempeño real del canal Trujipata dentro del sistema de riego del Proyecto Mariño. Las conclusiones y recomendaciones derivadas estuvieron orientadas a guiar intervenciones técnicas concretas en la cuenca media de Abancay durante 2025.

4.1.2 Nivel de investigación

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Lucio (2014), el nivel de investigación descriptivo-correlacional tiene como propósito “detallar las características de un fenómeno tal como se presenta en su contexto natural, y al mismo tiempo establecer relaciones entre dos o más variables sin manipulaciones experimentales” (p. 85). Este nivel permite describir los atributos de las variables y, mediante técnicas estadísticas, cuantificar la fuerza y dirección de sus asociaciones, siempre a partir de observaciones en el ambiente real de estudio.

En esta tesis se utilizó un nivel descriptivo-correlacional para caracterizar el desempeño hidráulico del canal Trujipata: se midieron cuantitativamente caudal, tirante y velocidad en campo y se analizaron estadísticamente las relaciones entre la rugosidad

(coeficiente de Manning) y la eficiencia hidráulica, sin alterar el sistema durante la recolección de datos ni la simulación en SWMM 5.2.

4.1.3 Diseño de investigación

El diseño no experimental transeccional implica la recolección de datos en un único momento o periodo acotado, para describir variables y examinar posibles relaciones entre ellas en ese instante temporal (Creswell & Creswell, 2018). En este diseño no se aplican tratamientos ni se asignan grupos; se observa y mide tal como se presentan en el contexto natural.

Se adoptó un diseño no experimental transeccional para recolectar datos de campo (pendiente, rugosidad) y ejecutar una simulación de 12 h en SWMM 5.2 durante la temporada de riego 2025, permitiendo describir el comportamiento hidráulico del canal Trujipata tal como operó en ese periodo.

4.1.4 Enfoque de investigación

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Lucio (2014), el enfoque cuantitativo se caracteriza por “la recolección y el análisis de datos numéricos, que permiten el uso de técnicas estadísticas para describir fenómenos, probar hipótesis y establecer relaciones entre variables de manera objetiva y replicable” (p. 26). Este enfoque privilegia la medición precisa, la estructuración de instrumentos estandarizados y el procesamiento de los datos mediante herramientas informáticas y estadística paramétrica.

En mi tesis “Evaluación del desempeño hidráulico en el sistema de riego del proyecto Mariño, sector cuenca media, Abancay – Apurímac - 2025” adopté un enfoque cuantitativo: diseñé y apliqué instrumentos de medición numérica (fórmula de Manning, simulaciones en SWMM 5.2), recopilé datos de caudal, tirante y velocidad en campo, y procesé los resultados con análisis estadístico para evaluar objetivamente la eficiencia hidráulica del canal Trujipata.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1 *Ámbito temporal*

El ámbito temporal de corte transversal (o transeccional) abarca la recolección de datos en un momento o lapso breve, sin seguimiento longitudinal, lo que permite una fotografía puntual del fenómeno estudiado (Sampieri, Collado & Lucio, 2014).

La recolección de datos de campo (medición de rugosidad, pendiente) y la simulación hidráulica en SWMM 5.2 se realizaron en un único periodo de operación continua de 12 h (06:00–18:00) durante la temporada de riego 2025, caracterizando así el desempeño del canal en condiciones máximas de demanda.

4.2.2 *Ámbito espacial*

Definición teórica. El ámbito espacial delimita geográficamente el escenario de estudio, definiendo el lugar, unidad territorial o sistema donde se desarrollan la recolección de datos y el análisis (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Aplicación específica. El estudio se circunscribió al tramo inicial del canal Trujipata (km 0+000 a km 0+860) dentro del sistema de riego del Proyecto Mariño, sector cuenca media de Abancay, Apurímac, donde se recolectaron datos de campo y se ejecutó la simulación hidráulica.

4.3 Población y muestra

4.3.1 *Población*

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Lucio (2014), la población se define como “el conjunto total de elementos, sucesos o unidades que comparten características comunes y sobre los cuales se desea obtener información para la investigación” (p. 104). La identificación adecuada de la población garantiza que los hallazgos puedan generalizarse al universo de estudio y que los parámetros estimados (medias, proporciones) reflejen las condiciones reales del fenómeno.

Aplicación específica. En mi tesis, la población consistió en la totalidad de los eventos de operación hidráulica del canal Trujipata durante la temporada de riego 2025 en el sistema de riego del Proyecto Mariño, sector cuenca media de Abancay. Consideré todas las variaciones de caudal y tirante que ocurrieron en ese periodo para describir exhaustivamente el comportamiento hidráulico real del canal.

4.3.2 Muestra

Definición teórica. Hernández Sampieri et al. (2014) señalan que la muestra es “un subconjunto representativo y manejable de la población, seleccionado mediante procedimientos que permiten que las inferencias sean válidas y confiables” (p. 112). La muestra debe cubrir las características esenciales de la población y definirse mediante criterios de inclusión claros, de modo que los resultados puedan extrapolarse con un grado de error aceptable.

Aplicación específica. Para el estudio seleccioné como muestra el tramo de 860 m del canal Trujipata (km 0+000–0+860) y un periodo de simulación continua de 12 horas en SWMM 5.2. Esta selección representó adecuadamente la variabilidad de condiciones hidráulicas de la población, permitiendo analizar con detalle la relación entre rugosidad y eficiencia.

4.4 Instrumentos

Definición teórica. Los instrumentos de investigación son las herramientas o dispositivos (físicos, electrónicos o informáticos) que permiten recolectar y registrar datos de manera sistemática y fiable (Creswell & Creswell, 2018).

Se utilizaron: Software HCanales V3.1 para determinar tirantes óptimos y caudales de máxima eficiencia. SWMM 5.2 para simular el comportamiento dinámico del flujo. Nivel y cinta métrica para verificar pendiente y dimensiones de buzones en campo.

4.5 Procedimientos

El procedimiento de investigación describe paso a paso las actividades y técnicas aplicadas para la recolección, tratamiento y análisis de datos, garantizando la reproducibilidad del estudio (Sampieri, Collado & Lucio, 2014).

- Revisión bibliográfica y definición del marco teórico.
- Medición de pendientes y dimensiones en campo.
- Cálculo de caudal óptimo con HCanales.
- Modelación del tramo en SWMM 5.2.
- Simulación de 12 h y extracción de resultados.
- Análisis e interpretación de datos.

4.6 Análisis de datos

Definición teórica. El análisis de datos cuantitativos implica la aplicación de técnicas estadísticas y de modelación numérica para describir, comparar y relacionar variables, así como para validar hipótesis (Babbie, 2013).

Aplicación específica. Se aplicaron cálculos de velocidad, tirante y caudal con la fórmula de Manning, y se procesaron los resultados de SWMM 5.2 para generar indicadores de eficiencia hidráulica, profundidades y régimen de flujo, sintetizados en tablas y gráficos descriptivos.

4.7 Consideraciones éticas

En la elaboración de esta investigación se mantuvo un firme compromiso con los principios éticos que deben guiar todo proceso científico, especialmente cuando este involucra la participación directa de personas y comunidades rurales. Desde el inicio hasta la etapa final, se actuó con respeto, transparencia y responsabilidad.

Todos los usuarios del sistema de riego que participaron en las encuestas y entrevistas fueron informados de manera clara sobre el objetivo del estudio, los temas a tratar y el uso que tendría la información obtenida. Su participación fue completamente voluntaria, y en ningún momento se les obligó ni condicionó a responder. Se valoró su tiempo, conocimiento y disposición para contribuir al desarrollo de la investigación.

Durante el trabajo de campo se mantuvo una actitud respetuosa hacia las costumbres, formas de organización y dinámicas comunales. No se interfirió en la toma de decisiones de la comunidad, ni se alteraron los procesos internos de gestión del sistema de riego. El equipo investigador se integró como observador colaborador, siempre con humildad y voluntad de aprender del entorno.

Finalmente, se asumió la responsabilidad de que este trabajo no solo tenga valor académico, sino que también aporte conocimientos útiles para mejorar la eficiencia y el manejo del agua en beneficio de las familias que dependen del riego. Se espera que los resultados puedan servir como herramienta de reflexión y apoyo para fortalecer la gestión comunal del recurso hídrico.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1 Descripción del área de estudio

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de los objetivos específicos planteados en la investigación, así como su respectiva interpretación técnica. Se incluyen los valores hidráulicos calculados, la simulación computacional del comportamiento del canal Trujipata mediante el software SWMM, y el análisis del desempeño del sistema bajo condiciones de máxima eficiencia. Finalmente, se discuten estos hallazgos en relación con estudios previos, destacando las implicancias prácticas para la gestión eficiente del recurso hídrico en sistemas de riego tecnificado.

5.1.2 Características generales del canal

a) Información institucional y antecedentes

El canal Trujipata, también denominado Canal R-2, forma parte del Proyecto de Gestión Integral de la Microcuenca Mariño – Apurímac I, impulsado por el Gobierno Regional de Apurímac a través de la Unidad Ejecutora Pro Desarrollo Apurímac (UEPDA). Este proyecto, cofinanciado por la Cooperación Financiera Alemana (KfW), tiene como finalidad mejorar sosteniblemente los sistemas productivos y optimizar el uso del recurso hídrico en la cuenca del río Mariño, ubicada en la provincia de Abancay, región Apurímac (UEPDA, 2013).

La construcción del canal fue contemplada en el expediente técnico aprobado en el año 2013 y ejecutada físicamente en 2019. Desde entonces, el canal se encuentra en funcionamiento, prestando servicios de riego por aspersión a los usuarios agrícolas del sector Trujipata.

b) Especificaciones técnicas de diseño

Este subsistema fue diseñado bajo tecnología de riego presurizado (aspersión), e incorpora una infraestructura hidráulica moderna que incluye cámaras de carga, válvulas de purga, cámaras rompepresión, entubados principales, hidrantes y válvulas de control. La conducción principal está compuesta por tubería de policloruro de vinilo (PVC) tipo ISO 4435 S-20, con un diámetro nominal de 315 mm y una pendiente longitudinal constante de 0.003 m/m (3 ‰), distribuidos a lo largo de una longitud total de 4 720 m.

Para facilitar el monitoreo y mantenimiento del sistema, el diseño contempla buzones de inspección ubicados a intervalos promedio de 400 m, lo que permite controlar el funcionamiento hidráulico del canal en campo.

c) Beneficiarios y cobertura del sistema

A partir de su implementación, el sistema de riego incorporó a 61 nuevos usuarios, quienes ahora forman parte de la Comisión de Usuarios del Canal Mariño. La infraestructura beneficia directamente a una superficie agrícola de 68 hectáreas, de las cuales 8.1 hectáreas ya estaban en uso previo a la intervención. Esta ampliación ha permitido una cobertura más eficiente, adaptada a la demanda hídrica de cultivos de alto valor económico, tales como maíz, alfalfa, frutales, papa, tomate y leguminosas.

d) Operación y distribución del recurso

El canal opera actualmente mediante una programación dividida en cuatro subsectores. Cada grupo de usuarios accede al agua en turnos definidos y controlados técnicamente, lo cual garantiza una distribución equitativa del recurso hídrico. Este esquema organizativo reduce los conflictos por escasez y contribuye a una mayor productividad agrícola en el área de influencia.

e) Valoración técnica y organizativa

La ejecución del canal Trujipata representa una mejora sustancial en la infraestructura de riego de la cuenca media del río Mariño. Su diseño y operación promueven la modernización agrícola, el uso racional del recurso hídrico y el fortalecimiento institucional de los comités de regantes. Además, constituye un modelo técnico replicable en otras microcuencas altoandinas con condiciones similares.

Figura 1

Ubicación del canal de conducción Trujipata



Nota. La imagen muestra la interfaz del módulo de programación de Delphin Express, destacando de obras. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Resultados por objetivos específicos

Determinar el caudal correspondiente a la condición de máxima eficiencia hidráulica del canal de conducción Trujipata.

La presente sección tiene como finalidad calcular el caudal correspondiente a la condición de máxima eficiencia hidráulica en el canal de conducción cerrado Trujipata. Esta

condición es relevante para evaluar la capacidad del sistema bajo su mayor rendimiento operativo, sin llegar a condiciones de flujo a presión.

Para este análisis, se consideraron los principios de la hidráulica de canales abiertos, aplicados a conducciones circulares parcialmente llenas que operan en régimen de flujo a superficie libre. Aunque el canal Trujipata está compuesto por tuberías cerradas, en la práctica se comporta como un canal parcialmente lleno durante su operación normal. Esta observación es sustentada empíricamente, ya que los usuarios derivan agua desde el canal Mariño hacia el Trujipata hasta que el tramo inicial del canal se llena visualmente, sin disponer de una medición directa del caudal. Esta práctica sugiere que el sistema opera cerca de su punto de máxima eficiencia hidráulica.

Desde el punto de vista técnico, en conducciones circulares, la máxima eficiencia hidráulica se alcanza cuando el producto del área hidráulica (A) y el radio hidráulico (R) es máximo. Esta condición no se logra con el conducto completamente lleno, sino cuando el tirante del flujo alcanza un valor crítico, que representa un porcentaje óptimo del diámetro interno de la tubería.

Para determinar el caudal teórico bajo esta condición, se aplicó la fórmula de Manning para flujo uniforme, que se expresa como:

EC- 7 *Manning*

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (7)$$

Donde:

Q= Caudal (m³/s)

n= Coeficiente de rugosidad de Manning (sin unidad)

A= Área hidráulica (m²)

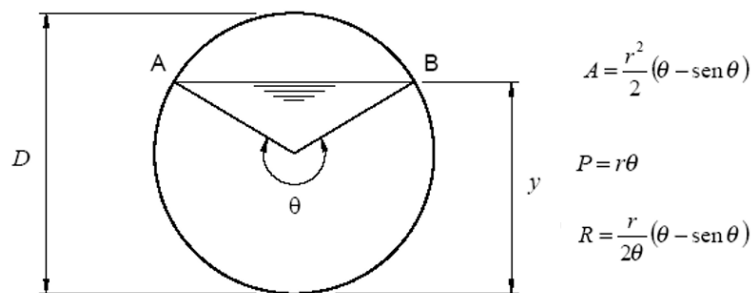
R= Radio hidráulico (m)

S= Pendiente hidráulica (m/m)

El coeficiente de rugosidad utilizado para el cálculo fue $n = 0.011$, valor representativo para tuberías de PVC en condiciones nuevas (United States Department of Agriculture [USDA], 1997). La tubería empleada tiene un diámetro interno de 315 mm (0.315 m) y una pendiente longitudinal constante de 0.003 m/m (3 ‰).

Figura 2

Características geométricas para un tubo parcialmente lleno



Nota. A: Área hidráulica, P: Perímetro mojado, R: Radio hidráulico.

Condición para Caudal Máximo: para determinar la sección para el caudal máximo se debe considerar el producto del Área Hidráulica y el Radio Hidráulico, en vista que ambos dependen del tirante.

$$\frac{d(AR^{2/3})}{d\theta} = 0 \rightarrow \frac{2}{3} AR^{-1/3} \frac{dR}{d\theta} + R^{2/3} \frac{dA}{d\theta} = 0 \rightarrow \theta = 5.278 \text{ rad}$$

$$y = r \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \rightarrow \frac{y}{D} = 0.938; D = 315 \text{ mm}$$

$$y = 0.938(0.315) = 0.29547 \text{ m}$$

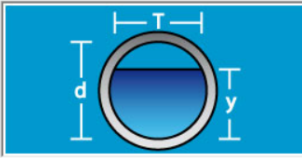
Mediante el uso del software HCanales V3.1, se calculó que el tirante óptimo para lograr el caudal de máxima eficiencia es de aproximadamente 0.295 m. Reemplazando este valor en la fórmula de Manning y aplicando los datos geométricos obtenidos para el flujo parcialmente lleno, se obtuvo un caudal máximo teórico de $0.0844 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 3

Caudal máximo calculado para el canal

Lugar:	TRUJIPATA - ABANCAY	Proyecto:	
Tramo:	CANAL TRUJIPATA	Revestimiento:	PVC

Datos:	
Tirante (y):	0.29547 m
Diámetro (d):	0.315 m
Rugosidad (n):	0.01
Pendiente (S):	0.003 m/m



Resultados:	
Caudal (Q):	0.0844 m ³ /s
Área hidráulica (A):	0.0759 m ²
Radio hidráulico (R):	0.0914 m
Número de Froude (F):	0.5018
Tipo de flujo:	Subcrítico
Velocidad (v):	1.1111 m/s
Perímetro mojado (p):	0.8311 m
Espejo de agua (T):	0.1519 m
Energía específica (E):	0.3584 m-Kg/Kg

Nota. En la figura se muestra el caudal calculado, por HCanales V3.1.

Este valor será utilizado como caudal de entrada en el modelo hidráulico desarrollado posteriormente en el software SWMM 5.2, lo que permitirá simular el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación real. De este modo, se puede evaluar el desempeño del canal, verificar su estabilidad hidráulica y validar la adecuación del diseño frente a su operación efectiva.

Simular el comportamiento hidráulico del canal de conducción Trujipata en el software SWMM utilizando el caudal óptimo determinado.

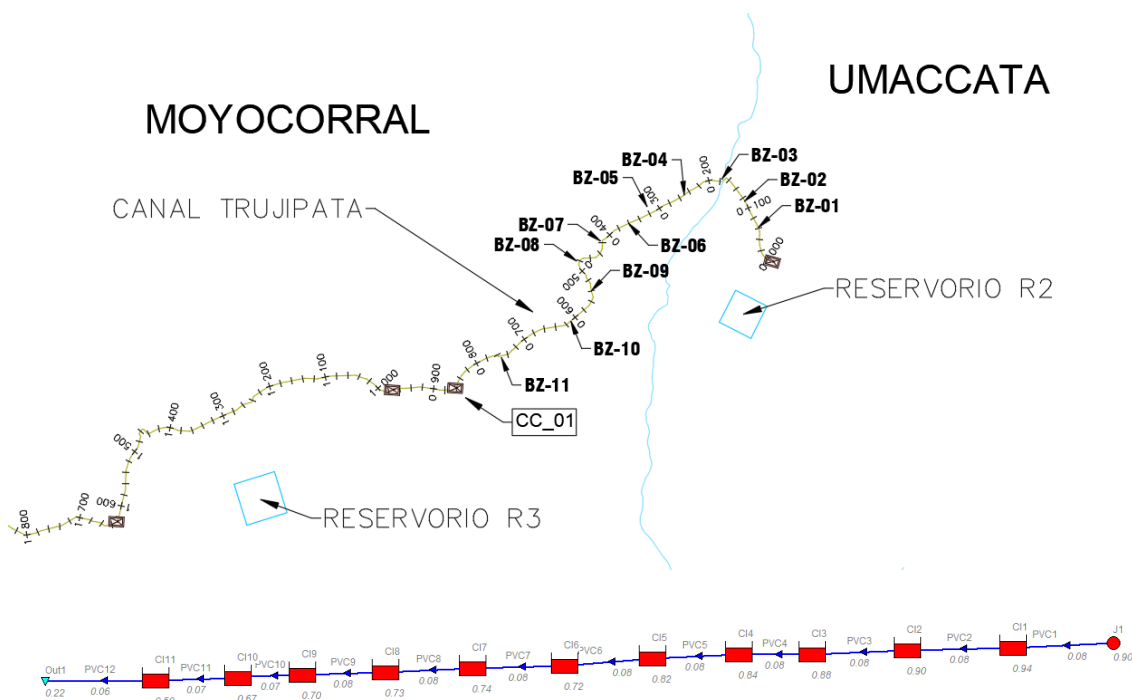
Con base en el caudal de máxima eficiencia hidráulica determinado en el ítem anterior ($0.0844 \text{ m}^3/\text{s}$), se procedió a simular el comportamiento del flujo en el canal Trujipata mediante el software Storm Water Management Model (SWMM) versión 5.2,

desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este programa permite modelar redes de conducción hidráulica en régimen de flujo libre y flujo a presión, utilizando las ecuaciones completas de Saint-Venant para simular condiciones dinámicas (Rossman, 2015).

Para fines de modelación, se seleccionó el tramo comprendido entre la progresiva km 0+000 (punto de derivación desde el canal Mariño) y km 0+860 (cámara de carga CC1), correspondiente al segmento de mayor caudal y condiciones hidráulicas estables durante las jornadas de riego. En este tramo no se producen derivaciones laterales, lo cual permite evaluar con mayor precisión el comportamiento del flujo bajo condiciones de carga constante.

Figura 4

Esquema del tramo evaluado del canal Trujipata



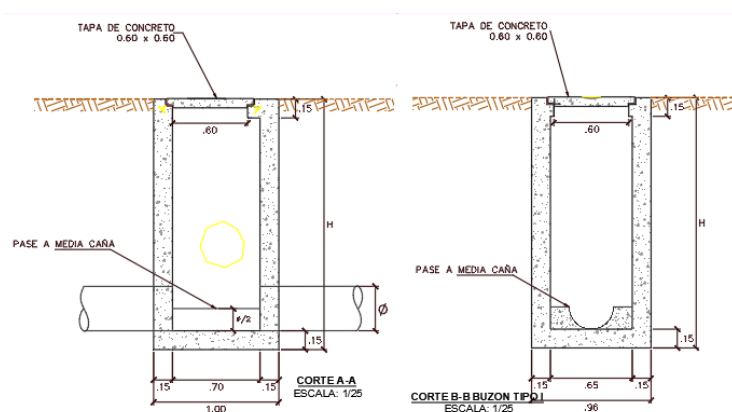
Nota. El tramo simulado comprende desde el nodo J1 (derivación inicial) hasta el nodo de salida CC1. Se incluyen once buzones de inspección (CI1 a CI11) distribuidos a lo largo de 860 m. Fuente: Elaboración propia

El esquema del sistema fue representado en el modelo hidráulico con los siguientes elementos: el punto de ingreso del caudal fue modelado como un nodo tipo Junction (J1); los once buzones de inspección como unidades tipo Storage (CI1 a CI11); y la cámara de carga final como un nodo de salida (Outfall). Las características geométricas de estos elementos fueron incorporadas según datos recolectados en campo.

En particular, los buzones de inspección fueron modelados como estructuras rectangulares con dimensiones de 0.60 m de ancho, 0.70 m de largo y 1.30 m de altura, lo cual permite representar adecuadamente su comportamiento hidráulico durante el tránsito del flujo.

Figura 5

Dimensiones de los buzones de inspección



Nota. Todos los buzones fueron representados como estructuras tipo “storage units” en el modelo SWMM, respetando las dimensiones medidas en campo. Fuente: Elaboración propia

El caudal de entrada aplicado en el nodo J1 fue de $0.0844 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a la condición de máxima eficiencia hidráulica. Se ejecutó una simulación dinámica de 12 horas continuas (06:00 a. m. – 06:00 p. m.), coincidente con el horario operativo del sistema de riego, para analizar la evolución del flujo, niveles hidráulicos y condiciones críticas en el tramo.

Los resultados mostraron que el nodo de ingreso (J1) presentó un flujo continuo durante el 97.89 % del tiempo simulado, con un caudal promedio de 0.082 m³/s y un caudal máximo de 0.084 m³/s. Este comportamiento indica estabilidad en la entrada del sistema y ausencia de obstrucciones.

Figura 6

Resumen del caudal afluente por nodo en el canal Trujipata

Summary Results								
Topic: Node Inflow		Click a column header to sort the column.						
Node	Type	Maximum Lateral Inflow CMS	Maximum Total Inflow CMS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Total Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Flow Balance Error %
J1	JUNCTION	0.084	0.084	0	00:00	3.64	3.64	0.109
Out1	OUTFALL	0.000	0.084	0	11:58	0	3.53	0.000
CI1	STORAGE	0.000	0.093	0	00:00	0	3.64	0.236
CI10	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.56	0.368
CI11	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.54	0.373
CI2	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.63	0.270
CI3	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.62	0.280
CI4	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.61	0.249
CI5	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.6	0.217
CI6	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.59	0.197
CI7	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.58	0.221
CI8	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.57	0.234
CI9	STORAGE	0.000	0.084	0	11:58	0	3.57	0.239

Nota. El nodo J1 presenta el mayor caudal registrado, correspondiente al punto de ingreso principal. Los demás nodos reflejan la continuidad del flujo sin ingresos laterales. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se registraron las profundidades hidráulicas alcanzadas en cada nodo del sistema. Las mayores profundidades se observaron en J1, CI1 y CI2, con valores máximos de hasta 0.96 m, especialmente a las 11:58 a. m., momento correspondiente al pico de caudal. Dato. SWMM 5.2

Figura 7

Resumen de profundidades por nodo en el canal Trujipata

Summary Results							
Topic: Node Depth		Click a column header to sort the column.					
Node	Type	Average Depth Meters	Maximum Depth Meters	Maximum HGL Meters	Day of Maximum Depth	Hour of Maximum Depth	Maximum Reported Depth Meters
J1	JUNCTION	0.88	0.96	2676.05	0	11:58	0.96
Out1	OUTFALL	0.22	0.22	2673.04	0	11:58	0.22
CI1	STORAGE	0.86	0.94	2675.89	0	11:58	0.94
CI10	STORAGE	0.62	0.67	2673.91	0	11:58	0.67
CI11	STORAGE	0.47	0.50	2673.43	0	11:58	0.50
CI2	STORAGE	0.83	0.90	2675.66	0	11:58	0.90
CI3	STORAGE	0.80	0.88	2675.44	0	11:58	0.88
CI4	STORAGE	0.77	0.84	2675.18	0	11:58	0.84
CI5	STORAGE	0.75	0.82	2675.01	0	11:58	0.82
CI6	STORAGE	0.66	0.72	2674.80	0	11:58	0.72
CI7	STORAGE	0.68	0.74	2674.62	0	11:58	0.74
CI8	STORAGE	0.68	0.73	2674.38	0	11:58	0.73
CI9	STORAGE	0.65	0.70	2674.17	0	11:58	0.70

Nota. Se evidencian las horas y valores de profundidad máxima, destacando el comportamiento uniforme del sistema en condiciones de máxima exigencia, por SWMM 5.2.

En cuanto al comportamiento de los buzones, se verificó que operaron entre el 36 % y el 72 % de su capacidad, sin desbordes ni pérdidas por evaporación o exfiltración. Los mayores niveles de llenado se observaron también a las 11:58 a. m., coincidiendo con el momento de caudal pico.

Figura 8

Volumen de almacenamiento y descarga en los buzones de inspección

Summary Results									
Topic: Storage Volume Click a column header to sort the column.									
Storage Unit	Average Volume 1000 m ³	Average Percent Full	Evaporation Loss %	Exfiltration Loss %	Maximum Volume 1000 m ³	Maximum Percent Full	Day of Maximum Volume	Hour of Maximum Volume	Maximum Outflow CMS
CI1	0.000	66.2	0.0	0.0	0.000	72.0	0	11:58	0.084
CI2	0.000	63.9	0.0	0.0	0.000	69.6	0	11:58	0.084
CI3	0.000	61.8	0.0	0.0	0.000	67.3	0	11:58	0.084
CI4	0.000	59.3	0.0	0.0	0.000	64.6	0	11:58	0.084
CI5	0.000	57.7	0.0	0.0	0.000	62.8	0	11:58	0.084
CI6	0.000	50.4	0.0	0.0	0.000	55.2	0	11:58	0.084
CI7	0.000	52.5	0.0	0.0	0.000	57.2	0	11:58	0.084
CI8	0.000	51.9	0.0	0.0	0.000	56.2	0	11:58	0.084
CI9	0.000	50.1	0.0	0.0	0.000	54.0	0	11:58	0.084
CI10	0.000	47.9	0.0	0.0	0.000	51.3	0	11:58	0.084
CI11	0.000	36.5	0.0	0.0	0.000	38.6	0	11:58	0.084

Nota. Se CI1, CI2 y CI3 registraron los mayores niveles de ocupación, sin alcanzar valores críticos. El comportamiento fue hidráulicamente estable en todos los nodos, por SWMM 5.2.

En el nodo de salida (Out1), correspondiente a la cámara de carga CC1, se identificó un caudal promedio de descarga de 0.082 m³/s y un caudal máximo de 0.084 m³/s, con un volumen total evacuado de 3.530 millones de litros.

Figura 9

Caudal descargado en la salida del sistema (Out1)

Summary Results				
Topic: Outfall Loading Click a column header to sort the column.				
Outfall Node	Flow Frequency %	Average Flow CMS	Maximum Flow CMS	Total Volume 10 ⁶ ltr
Out1	97.89	0.082	0.084	3.530

Nota. Se evidencia un patrón de descarga constante y eficiente durante todo el periodo de simulación, por SWMM 5.2.

Finalmente, se analizaron los tramos de conducción PVC1 a PVC12. En general, todos los tramos mantuvieron una profundidad máxima cercana al 100 % del diámetro, excepto PVC12, que operó al 85 %. Sin embargo, los valores de caudal relativo (flujo máximo / capacidad del tubo lleno) fueron mayores a 1 en los tramos PVC11 (1.23) y PVC12 (1.85), lo que sugiere condiciones de flujo a presión o sobredemanda localizada.

Figura 10

Resumen de caudales, velocidades y condiciones de llenado en las conducciones del canal Trujipata

Summary Results							
Topic: Link Flow							
Click a column header to sort the column.							
Link	Type	Maximum [Flow] CMS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
PVC1	CONDUIT	0.093	0	00:00	1.61	1.19	1.00
PVC2	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.45	1.08	1.00
PVC3	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.39	1.08	1.00
PVC4	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.31	1.08	1.00
PVC5	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.25	1.08	1.00
PVC6	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.21	1.38	1.00
PVC7	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.39	0.94	1.00
PVC8	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.33	1.03	1.00
PVC9	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.32	1.08	1.00
PVC10	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.43	1.08	1.00
PVC11	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.24	1.23	1.00
PVC12	CONDUIT	0.084	0	11:58	1.19	1.85	0.85

Nota. Los tramos PVC11 y PVC12 presentan posibles condiciones de sobredemanda que podrían requerir monitoreo adicional, por SWMM 5.2.

Figura 11*Clasificación del régimen de flujo en los tramos del canal Trujipata*

Conduit	Adjusted/ Actual Length	Fully Dry	Upstrm Dry	Dnstrm Dry	Sub Critical	Super Critical	Upstrm Critical	Dnstrm Critical	Normal Flow Limited	Inlet Control
PVC1	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC3	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC4	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC5	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC6	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC7	1.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC8	1.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
PVC9	1.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC10	1.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC11	1.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVC12	1.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota. Todos los tramos operan predominantemente en régimen subcrítico, sin evidencia de flujos supercríticos ni desbordamientos, por SWMM 5.2.

La simulación confirma que el canal Trujipata, en su tramo inicial, opera dentro de los parámetros técnicos previstos, manteniendo una conducción eficiente y estable del recurso hídrico. No obstante, los tramos con flujo a presión representan zonas que deben ser monitoreadas para prevenir eventuales sobreelevaciones o condiciones operativas adversas.

Evaluar el desempeño hidráulico del canal, identificando tramos con flujo a presión o posibles desbordes en los buzones de inspección a lo largo del recorrido.

La evaluación del desempeño hidráulico del canal Trujipata se realizó mediante el análisis de los resultados generados en el software SWMM 5.2, con especial énfasis en la identificación de tramos que operan en condición de flujo a presión y en la verificación del comportamiento de los buzones de inspección ante la máxima exigencia del sistema.

Para ello, se empleó la herramienta de visualización de perfiles longitudinales del SWMM, que permite observar de forma gráfica la evolución del nivel del agua a lo largo de todo el canal. Este análisis facilita la detección de zonas críticas donde el flujo alcanza el

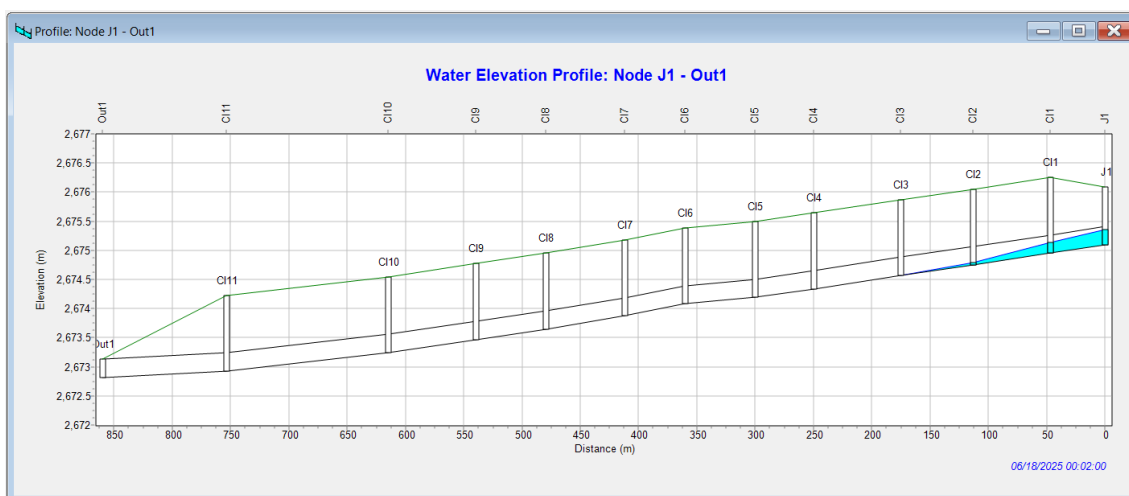
llenado total del conducto, así como posibles puntos de sobreelevación hidráulica en estructuras auxiliares como los buzones.

La simulación fue desarrollada para un periodo de 12 horas continuas, comprendidas entre las 06:00 a. m. y las 06:00 p. m., correspondiente al horario operativo del sistema de riego. Fuera de este intervalo, el sistema se cierra, y el volumen restante se deriva hacia los reservorios R2 y R3 para su almacenamiento.

Durante los primeros minutos de operación, el flujo se localiza únicamente en el tramo de ingreso, sin alcanzar aún las estructuras aguas abajo.

Figura 12

Perfil de elevación del agua en el al inicio de la simulación (00:02)

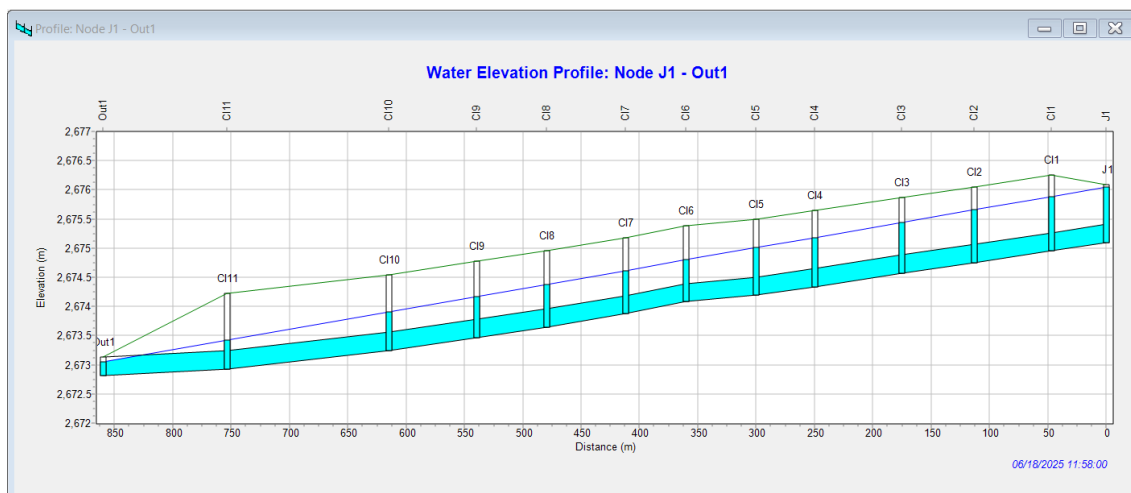


Nota. Se observa el inicio del llenado del sistema, con lámina de agua presente solo en el tramo J1–CI11, por SWMM 5.2.

En contraste, al alcanzar el horario de mayor demanda, el sistema evidencia un comportamiento hidráulico distinto. A las 11:58 a. m., momento correspondiente al pico de caudal, todos los tramos del canal (PVC1 a PVC12) presentan condición de llenado total, lo que indica operación en régimen de flujo a presión.

Figura 13

Perfil de elevación del agua en hora de caudal máximo (11:58)



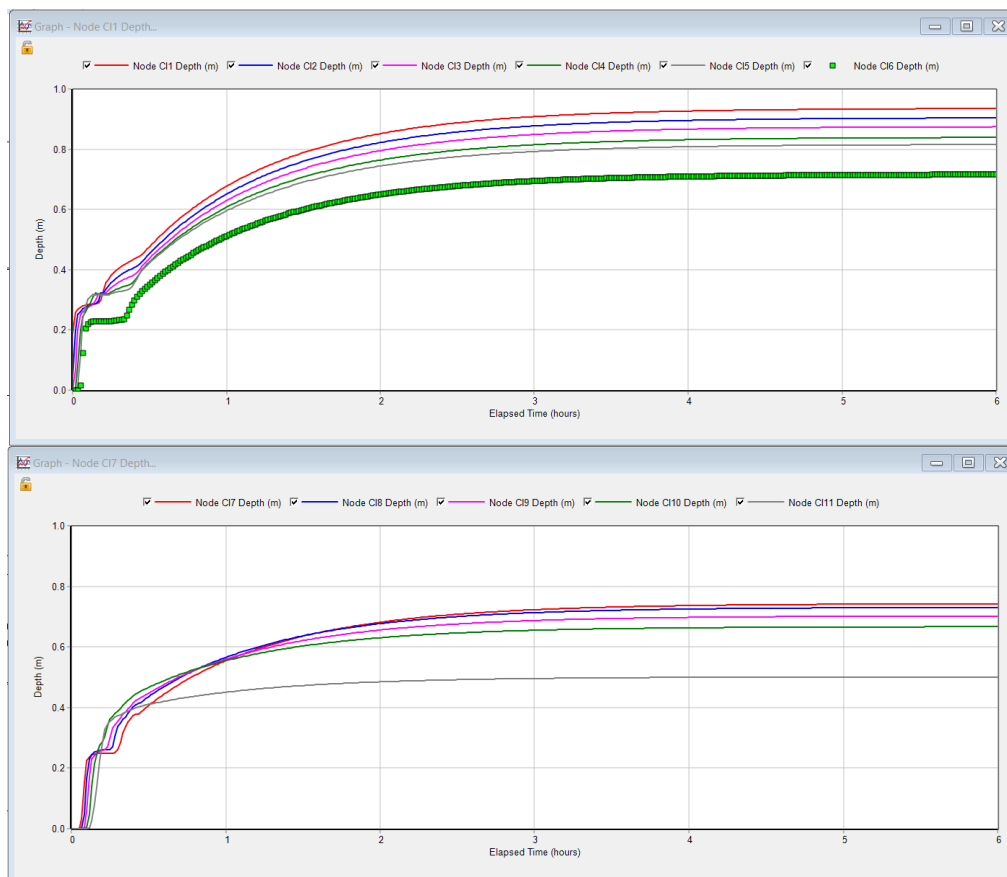
Nota. La línea de gradiente hidráulico se sitúa por encima del eje superior de la tubería, indicando conducción a presión, por SWMM 5.2.

Esta condición no es necesariamente inadecuada, pero representa una exigencia hidráulica máxima del sistema que debe ser gestionada adecuadamente. En particular, los tramos PVC11 y PVC12 presentaron valores de caudal superior a la capacidad de tubo lleno (hasta 1.85 veces en PVC12), confirmando la existencia de sobrepresiones o sobredemanda localizada.

En lo que respecta a los buzones de inspección (CI1 a CI11), se verificó que operaron de forma estable durante todo el periodo simulado. Aunque algunos alcanzaron entre el 65 % y 72 % de su capacidad de almacenamiento durante el caudal pico, no se detectaron desbordes ni sobreelevaciones críticas.

Figura 14

Simulación del nivel de agua en los buzones de inspección durante el caudal pico



Nota. Los nodos CI1 a CI3 fueron los más exigidos hidráulicamente, sin superar el umbral de riesgo, por SWMM 5.2.

Este análisis permite concluir que, si bien la conducción opera al límite de su capacidad durante las horas de mayor demanda, el sistema mantiene su estabilidad hidráulica general. Sin embargo, los tramos que operan bajo condiciones de presión deben ser monitoreados periódicamente, ya que cualquier obstrucción, acumulación de sedimentos o incremento en la demanda podría generar condiciones de riesgo.

5.1 Discusión de Resultados

Los resultados hidráulicos obtenidos en la presente investigación, mediante simulación con el software SWMM 5.2 y verificación con la fórmula de Manning, encuentran sustento en diversas investigaciones previas que abordaron problemáticas similares en canales de irrigación de baja pendiente y sistemas de conducción entubada o revestida.

En primer lugar, Asalde (2020) realizó una simulación hidráulica utilizando el software HEC-RAS para el diseño de un canal en el distrito de Salas (Lambayeque), alcanzando una eficiencia hidráulica óptima y determinando zonas críticas de desbordes debido a la topografía y geometría del canal. Dicho estudio, al igual que el presente trabajo, empleó el criterio del U.S. Bureau of Reclamation (USBR) y la fórmula de Manning para validar el caudal y el tirante normal, obteniendo velocidades y regímenes de flujo estables. En el canal Trujipata, mediante el software SWMM, se evidenció un régimen subcrítico constante y un comportamiento a presión en los tramos PVC11 y PVC12, situación comparable a las zonas de sobrecarga identificadas por Asalde. Ambas investigaciones refuerzan la utilidad de la simulación computacional para el diseño confiable de canales de riego (Asalde, 2020).

En segundo lugar, la tesis de López Aguilar (2020) sobre el canal Carlos Leight en Chimbote se enfocó en la evaluación estructural y su relación con la eficiencia hídrica. A pesar de ser un análisis más visual y empírico, sus resultados indican que la degradación física del canal afecta la eficiencia hidráulica, identificando un 27.34 % de patologías en la estructura. En el presente estudio, si bien se trabajó con tuberías de PVC nuevas, se observó que las zonas de presión generadas por acumulación de caudal pueden generar situaciones operativas críticas si no se gestionan con válvulas o cámaras de rotura de carga. Esto

demuestra que tanto los factores estructurales como los hidráulicos deben ser considerados para garantizar la funcionalidad del sistema de riego (López Aguilar, 2020).

Asimismo, Gutierrez Cuestas (2021), en su tesis sobre el revestimiento de un canal en Cajamarca, demostró que el cambio de sección en tierra a concreto permitió aumentar el caudal de diseño de $0.201 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.701 \text{ m}^3/\text{s}$ y alcanzar una eficiencia hidráulica del 100 %. Aunque la presente investigación optó por una conducción cerrada en PVC, los resultados fueron similares: se logró eliminar pérdidas por infiltración y mantener velocidades dentro del rango recomendado. Ambos estudios coinciden en que el tipo de material y revestimiento influye de manera determinante en la eficiencia del sistema hidráulico (Gutierrez Cuestas, 2021).

Finalmente, el estudio de Pillhuamán y Delgado (2023) comparó el comportamiento de canales trapezoidales y rectangulares aplicando el criterio de máxima eficiencia hidráulica (MEH) bajo condiciones de baja pendiente. A través de diez alternativas de simulación, se concluyó que los canales trapezoidales revestidos son más eficientes, manteniendo el flujo subcrítico en todas las alternativas y cumpliendo los criterios de diseño (velocidad, Froude, borde libre y ancho de solera). En el canal Trujipata, la pendiente uniforme de 3 ‰ permitió también operar bajo condiciones subcríticas en el 99 % del tiempo simulado. Este resultado confirma que la aplicación del criterio MEH, tanto en canales abiertos como en conducciones cerradas, es clave para lograr un diseño hidráulico técnicamente óptimo (Pillhuamán & Delgado, 2023).

En conjunto, estas investigaciones respaldan y validan los resultados del presente estudio, reforzando que la simulación computacional, la selección adecuada de materiales y la aplicación del criterio de eficiencia hidráulica son elementos fundamentales para el diseño de canales tecnificados en zonas rurales de topografía variable.

Limitaciones

Durante el desarrollo del presente estudio se identificaron ciertas limitaciones técnicas que deben ser consideradas al momento de interpretar los resultados obtenidos. La principal limitación radica en la discrepancia entre la pendiente teórica definida en el expediente técnico y la pendiente real observada en campo.

Aunque el diseño hidráulico del canal Trujipata consideró una pendiente longitudinal constante de 3 ‰ (0.003 m/m), el levantamiento topográfico efectuado durante el trabajo de campo y la posterior simulación hidráulica indicaron la existencia de variaciones en la pendiente efectiva, con tramos que presentan hasta un 2 ‰. Esta diferencia, aunque aparentemente leve, impacta significativamente en el comportamiento del flujo, generando condiciones de flujo a presión en algunos tramos y provocando niveles elevados en los buzones de inspección, especialmente durante el periodo de caudal pico.

Estas discrepancias no fueron contempladas en el diseño original y afectan directamente la validez completa del modelo teórico. Como consecuencia, el análisis hidráulico desarrollado en este estudio representa un escenario idealizado, basado en parámetros promedios. Si bien el modelo es útil para evaluar el desempeño general del sistema, no captura con precisión todos los fenómenos locales asociados a las microvariaciones de pendiente.

Además, la falta de datos históricos de operación del canal, como registros continuos de caudales, presiones o niveles en campo, limitó la posibilidad de validar empíricamente los resultados de la simulación. En este sentido, el modelo hidráulico se apoyó principalmente en datos teóricos y observaciones puntuales realizadas durante las visitas técnicas.

Finalmente, es importante señalar que el software SWMM, aunque robusto y versátil, fue diseñado originalmente para modelar sistemas urbanos de drenaje pluvial, por lo que su aplicación en contextos rurales con conducción presurizada requiere una interpretación cuidadosa de los resultados, particularmente en lo relativo a la representación de las estructuras de almacenamiento como los buzones de inspección.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero deben ser consideradas como factores condicionantes del alcance y precisión del análisis hidráulico desarrollado.

Implicancias prácticas

Los resultados obtenidos en esta investigación presentan implicancias relevantes tanto para el diseño como para la operación de sistemas de riego presurizado en zonas altoandinas, particularmente en contextos donde la topografía irregular y la disponibilidad limitada del recurso hídrico representan desafíos para la eficiencia hidráulica.

En primer lugar, se evidencia la necesidad de verificar en campo las condiciones reales de pendiente antes de la ejecución de obras de conducción cerrada. En el caso del canal Trujipata, la discrepancia entre la pendiente teórica (3 ‰) y la pendiente observada en tramos específicos (hasta 2 ‰) generó alteraciones en el régimen de flujo, ocasionando la presencia de tramos con flujo a presión. Estas condiciones no previstas podrían, en el mediano plazo, afectar la eficiencia y estabilidad operativa del sistema.

Como respuesta, se recomienda incorporar en futuros proyectos un control topográfico riguroso durante la etapa de construcción, que permita ajustar en tiempo real la pendiente del canal y reducir la posibilidad de generar zonas hidráulicamente inestables. Asimismo, la instalación de válvulas de control y cámaras rompedoras en los tramos

identificados con flujo a presión puede actuar como medida de mitigación efectiva, reduciendo el riesgo de sobreelevación o daños en las estructuras auxiliares.

En segundo lugar, los resultados resaltan la importancia de implementar sistemas de monitoreo hidráulico continuo, mediante sensores de nivel, caudal y presión. Estos dispositivos permitirían registrar el comportamiento real del canal durante su operación diaria, facilitando una gestión preventiva basada en datos reales y no únicamente en observaciones visuales o estimaciones empíricas.

Además, el uso de herramientas de simulación como SWMM demuestra ser una alternativa válida y accesible para evaluar escenarios de operación, verificar el diseño y anticipar condiciones críticas, especialmente en zonas rurales donde el recurso técnico y financiero puede ser limitado. No obstante, su aplicación debe ser acompañada por una interpretación técnica adecuada, reconociendo las limitaciones del modelo en contextos de conducción presurizada.

Finalmente, los resultados de esta investigación pueden ser utilizados como insumo para replicar el modelo de intervención en otras microcuencas altoandinas. La experiencia del canal Trujipata constituye una referencia práctica sobre los beneficios y desafíos de implementar sistemas de riego tecnificado en zonas de topografía compleja, aportando al fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la gestión integrada y sostenible del recurso hídrico en el ámbito rural.

VI. Conclusiones

1. Del objetivo general. Se concluye que el canal Trujipata, diseñado como una conducción cerrada en PVC para riego por aspersión, opera eficientemente bajo condiciones de máxima demanda hidráulica. La combinación de métodos teóricos, como la fórmula de Manning, y herramientas de simulación computacional mediante el software SWMM, permitió validar el diseño del sistema, identificar zonas críticas y proponer medidas operativas para mejorar su desempeño. No obstante, se identificaron tramos con condiciones de flujo a presión, que podrían comprometer la estabilidad del sistema si no se gestionan adecuadamente.

2. Del objetivo específico 1. Se determinó que el caudal óptimo de operación del canal Trujipata es de $0.0844 \text{ m}^3/\text{s}$, calculado bajo condiciones de flujo uniforme en conducción circular parcialmente llena, utilizando la fórmula de Manning, el tirante óptimo fue de 0.295 m, con una pendiente hidráulica de 0.003 m/m y un coeficiente de rugosidad de $n = 0.011$, representativo para tuberías de PVC nuevas esta condición garantiza una conducción eficiente del agua, minimizando pérdidas energéticas y manteniendo el régimen subcrítico deseado.

3. Del objetivo específico 2. El modelo desarrollado en SWMM 5.2 reprodujo adecuadamente el comportamiento hidráulico del tramo inicial del canal bajo condiciones de operación diaria, se verificó que el sistema mantiene un régimen de flujo subcrítico en más del 99 % del tiempo simulado, confirmando su estabilidad hidráulica los buzones de inspección operaron dentro de su capacidad de almacenamiento (entre 36 % y 72 %), sin evidencias de desbordes, pérdidas o interrupciones.

4. Del objetivo específico 3. Se identificaron tramos específicos (PVC11 y PVC12) con valores de caudal superiores a la capacidad del conducto a tubo lleno, lo cual indica condiciones de flujo a presión y sobredemanda localizada, aunque estas condiciones no causaron desbordes, representan zonas críticas que requieren monitoreo y posibles intervenciones como la instalación de válvulas de control o cámaras rompepresión, la modelación permitió anticipar el comportamiento del sistema bajo el escenario más exigente, brindando información útil para futuras acciones de mantenimiento y mejora.

VII. Recomendaciones

1. Del objetivo general. Se recomienda la implementación de un sistema integral de monitoreo y control hidráulico en el canal Trujipata. Este sistema debe incluir el seguimiento de caudales, niveles y presiones, así como mecanismos para ajustar la operación de válvulas y dispositivos de control en función de la demanda. Además, se sugiere fortalecer la supervisión técnica durante la etapa constructiva para asegurar el cumplimiento de las condiciones de diseño, especialmente en relación con la pendiente del canal.

2. Del objetivo específico 1. Validar periódicamente en campo los parámetros hidráulicos del canal, como la pendiente efectiva y el coeficiente de rugosidad, ya que pequeñas variaciones influyen directamente en el comportamiento del flujo y en la condición de máxima eficiencia, instalar sensores de nivel o caudal en el tramo de entrada del sistema, lo que permitiría un control más preciso de la operación sin depender exclusivamente de observaciones visuales.

3. Del objetivo específico 2. Ampliar la simulación hidráulica a todo el tramo del canal Trujipata, no solo a su tramo inicial, con el fin de identificar posibles condiciones críticas aguas abajo que no fueron evaluadas en esta investigación, actualizar el modelo hidráulico desarrollado en SWMM cada vez que se realicen modificaciones en la infraestructura o cambien las condiciones operativas del canal, para mantenerlo como una herramienta de gestión útil y confiable.

4. Del objetivo específico 3. Instalar válvulas de control o cámaras rompedoras en los tramos donde se identificó flujo a presión, particularmente entre los tramos PVC9 y PVC12, a fin de evitar posibles sobreelevaciones o fatiga estructural por presión constante, programar mantenimientos preventivos en los buzones de inspección, especialmente en

aquellos que operan con mayor carga hidráulica (CI1 a CI3), para evitar acumulación de sedimentos u obstrucciones que puedan generar desbordes durante el caudal pico, realizar un levantamiento hidrotopográfico postconstrucción, que permita comparar la pendiente real ejecutada con la proyectada, y corregir tramos que presenten discrepancias que afecten el desempeño hidráulico del sistema.

VIII. Referencias

ANA. (2015). *Reglamento de Organizaciones de Usuarios de Agua (ROUA)*. Autoridad Nacional del Agua.

Anaya, M., León, B., Cabas, N., Porto, E., & Morales, R. (1997). *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/4/ai128s/ai128s00.pdf>.

Asalde Yupton, J. W. (2020). *Diseño del canal de riego con máxima eficiencia hidráulica mediante el software HEC-RAS, del tramo km 0+000 al km 3+085, en el distrito de Salas, región Lambayeque* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio USMP. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/6942>

Autoridad Autónoma de Majes. (2022, junio 6). *AUTODEMA realiza investigación para mejorar el riego en la Pampa de Majes*. <https://www.autodema.gob.pe/autodema-realiza-investigacion-para-mejorar-el-riego-en-la-pampa-de-majes>.

Babbie, E. (2013). *The practice of social research* (13^a ed.). Cengage. http://old-eclass.uop.gr/modules/document/file.php/SEP187/BI%CE%92%CE%9B%CE%99%CE%91%20%CE%9C%CE%95%CE%98%CE%9F%CE%94%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%91%CE%A3/Babbie_The_Practice_of_Social_Research.pdf

Cáceres Choque, J. C. (2021). *Evaluación de la huella hídrica en el cultivo de papa en la región de Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20942>.

- Cahua Villasante, A. (2020). *Evaluación del sistema de riego por aspersión Huancasayani Ñacoreque y su relación con la producción agrícola en Cuyocuyo - Sandia* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14588>.
- Cevallos, C., & Montenegro, E. (2021). *Sistemas de riego: diseño y eficiencia*. Editorial Agroingeniería.
- Contreras Ludeña, W. J. (2021). *Evaluación de la eficiencia del sistema de riego Santa Rosa – distrito de Curahuasi – Apurímac – 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio UTEA. <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/20.500.12886/380>.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5^a ed.). SAGE. https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/510378/mod_resource/content/1/creswell.pdf
- FAO. (2017). *El riego en América Latina y el Caribe: entorno y desarrollo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2017). *Guía para la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2017). *Manual de eficiencia en el uso del agua para la agricultura de regadío*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i3790s/i3790s.pdf>.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2009). *Guía sectorial riego*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/ak209s/ak209s00.pdf>

- GIZ. (2020). *Riego solar en zonas altoandinas del Perú: guía práctica para pequeños agricultores*. Cooperación Alemana al Desarrollo.
- Gutierrez Cuestas, L. D. P. (2021). *Mejoramiento hidráulico de un canal de riego aplicando revestimiento de concreto, Cospán, Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/74456>
- Haile, A. T., Feyisa, K., & Berhanu, B. (2020). Evaluating irrigation scheduling and application efficiency: Baseline to revitalize Meki-Ziway irrigation scheme, Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1522. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03226-8>.
- Hakiruwizera, A., Niyonzima, P., & Habimana, S. (2023). Performance Evaluation of a Drip Irrigation System inside the Automated Greenhouse in Huye Ecological Condition. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/378286650>.
- Hameed, Y. T., & Jebur, M. N. (2023). Hydraulic Performance of a Solar-Powered Drip Irrigation System. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/370172465>.
- Helvetas Perú. (2023). *Cierre del Proyecto Agua para Abancay y Comunidades para siempre: Aportes para la seguridad hídrica de las ciudades andinas desde el sector saneamiento*. https://www.helvetas.org/es/peru/quienes-somos/siguenos/Noticias/Cierre-del-Proyecto-Agua-para-Abancay-y-Comunidades-para-siempre-aportes-para-la-seguridad-hidrica-de-las-ciudades-andinas-desde-el-sector-saneamiento_pressrelease_12591.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.

https://uniclanet.unicla.edu.mx/assets/contenidos/254857_DOC_2023-03-01_18:46:18.pdf

Huanca Quiroz, E. U. (2020). *Determinación de la huella hídrica en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd) en la cuenca del río Ilave – Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano Puno]. Repositorio Institucional UNAP. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/20.500.14082/15681/1/Huanca_Quiroz_El_isban_Uriel.pdf.

Inforegión. (2022, noviembre 23). *La tecnología para el uso eficiente del agua en la agricultura*. <https://inforegion.pe/la-tecnologia-para-el-uso-eficiente-del-agua-en-la-agricultura/>.

López Aguilar, G. (2020). *Evaluación de la estructura hidráulica en el canal de riego Carlos Leight entre los tramos 23+000, 23+500 en el C.P. de Tangay, del distrito de Nuevo Chimbote, provincia del Santa, departamento de Áncash y su incidencia en la condición hídrica de la población – 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote]. Repositorio ULADECH. <https://repositorio.uladech.edu.pe/handle/20.500.13032/19250>

López Medina, M. S., Neri-Ramírez, E., & Rodríguez Morán, H. M. (2024). *La importancia de los sistemas de riego para el uso eficiente del agua en la agricultura*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/383306124>.

Mamani Quispe, M. A. (2021). *Evaluación del uso del recurso hídrico en el sistema de riego de las comunidades de Chacapuquio – distrito de Huanipaca – Apurímac*

- [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio UTEA. <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/20.500.12886/432>.
- Martínez, F., Soto, J., & García, L. (2022). *Monitoreo satelital aplicado al riego agrícola: experiencias en el sur del Perú*. Revista AgroSistemas, 18(1), 55-66.
- MIDAGRI. (2020). *Guía técnica para el diseño de sistemas de riego tecnificado*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
- Netafim. (2021). *Tecnologías de riego eficientes*. <https://www.netafim.com/es/>.
- Netafim. (2022). *Soluciones inteligentes para riego tecnificado*. <https://www.netafim.com/es/>.
- Nieto, C., Pazmiño, E., Rosero, S., & Quishpe, B. (2023). Estudio del aprovechamiento de agua de riego disponible por unidad de producción agropecuaria. Revista Agroproductividad, 16(2), 45–58. <https://www.redalyc.org/journal/6538/653868369005>.
- Palerm Viqueira, J. (2019). *La gestión del agua en los sistemas tradicionales de riego*. Instituto de Investigaciones Sociales – UNAM.
- Pillhuamán Silvera, B. C., & Delgado Sotelo, D. R. (2023). *Variación de la máxima eficiencia hidráulica en los diseños de canales de irrigación rectangulares y trapezoidales de baja pendiente* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <http://hdl.handle.net/10757/669985>
- Prieto, D. R., Angella, G., Angueira, C., Pérez Carrera, A., & Moscuza, C. (2014). *Indicadores de desempeño del sistema de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina* (pp. 54–56). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua.

https://www.researchgate.net/publication/37790425_Indicadores_de_desempeno_d_el_sistema_de_riego_del_Rio_Dulce_Santiago_del_Estero_Argentina

Pratama, H., & Mandela, F. (2024). Evaluating the Effectiveness of Smart Irrigation Systems in Improving Agricultural Productivity. *ResearchGate*.
<https://www.researchgate.net/publication/387171706>.

PSI. (2018). *Manual técnico de infraestructura de riego*. Programa Subsectorial de Irrigaciones.

PSI. (2018). *Manual técnico de operación y mantenimiento de sistemas de riego*. Programa Subsectorial de Irrigaciones.

PSI. (2020). *Informe de evaluación de compuertas automatizadas en sistemas de riego comunitarios*. Programa Subsectorial de Irrigaciones.

Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency.

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100N1W1.PDF>

SINIA. (2019). *Estadísticas de demanda y uso del agua en Apurímac*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/1467.pdf>.

Smith, J., & Brown, K. (2020). An Evaluation of Irrigation Water Use Efficiency in Crop Production Using a Data Envelopment Analysis Approach: A Case of Louisiana, USA. *Water*, 12(11), 3193. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/3193>.

Unidad Ejecutora Pro Desarrollo Apurímac. (2013). *Expediente técnico del proyecto de ampliación del sistema de riego tecnificado canal Mariño*. Gobierno Regional de Apurímac.

United States Department of Agriculture. (1997). *National engineering handbook: Irrigation*. USDA Natural Resources Conservation Service.

<https://www.nrcs.usda.gov>

Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). (2021). *Seminario de biodiversidad: Gestión sostenible en la cuenca Mariño, Apurímac*.

https://web.lamolina.edu.pe/unidad_posgradofep/doctorado_economia/wp-content/uploads/2021/05/Seminario-de-Biodiversidad.pdf.

Velásquez Ninahuamán, J. R. (2023). *Análisis de eficiencia hídrica en el sistema de riego Llaullipata – Abancay – 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio UTEA.

<https://repositorio.utea.edu.pe/handle/20.500.12886/576>.

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