

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial
Departamento de Obras Civiles

**OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN HÍDRICA
BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ. CANAL
BUZETA, CUENCA DEL RÍO CHOAPA.**

Álvaro Alejandro Espinoza Arias
MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA
SEPTIEMBRE 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Optimización de la distribución hídrica bajo condiciones de escasez. Canal Buzeta, cuenca del río Choapa.

Nombre del candidato(a): Álvaro Alejandro Espinoza Arias

Carrera / Grado: Magíster en Gestión del Agua – Master of Water Management

Campus: Vitacura

Departamento: Ingeniería Comercial /Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Vivian Aranda Núñez**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08-10-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a)

Fecha: 08-10-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA
MWM MASTER OF WATER MANAGEMENT

Departamento de Ingeniería Comercial
Departamento de Obras Civiles

OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN HÍDRICA BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ. CANAL BUZETA, CUENCA DEL RÍO CHOAPA.

Tesis de magíster presentada por
Álvaro Alejandro Espinoza Arias
Como requisito para optar al Grado de
MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA

Director de Tesis:
Dra. Vivian Aranda Núñez
Septiembre 2026

TITULO DE TESIS:

OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN HÍDRICA BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ. CANAL BUZETA, CUENCA DEL RÍO CHOAPA.

AUTOR:

ÁLVARO ALEJANDRO ESPINOZA ARIAS

TRABAJO DE TESIS, presentando en cumplimiento parcial los requisitos para el grado de MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA – MASTER OF WATER MANAGEMENT de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Observaciones:

Dra. Vivian Aranda Núñez
Director de Tesis

Dr. Raúl Flores Audibert
Correferente Interno

Mg. Gonzalo Murillo Vargas
Correferente Externo

Santiago, Septiembre 2026

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: Álvaro Alejandro Espinoza Arias

Firma:

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized representation of the name.

Fecha: septiembre de 2026

RESUMEN EJECUTIVO

Esta tesina evalúa la aplicabilidad de un modelo de acumulación lateral para mejorar la distribución del recurso hídrico en el Canal Buzeta, cuenca del río Choapa, Región de Coquimbo, bajo condiciones de escasez hídrica, prorrata y turnos de riego restringidos. La investigación surge ante la limitada capacidad de regulación intermedia del sistema, la extensión del canal y la disminución de la disponibilidad efectiva de agua para los usuarios.

La metodología integró antecedentes territoriales, topográficos, hidráulicos, operacionales, normativos y económico-sociales. Se identificaron quince sectores potenciales en quebradas o espacios laterales próximos al canal, aplicando criterios de preselección asociados al emplazamiento fuera de cauce, altura de muro, volumen de almacenamiento, relación con el trazado del canal, factibilidad de llenado y restitución, requerimientos de elevación y restricciones territoriales. Para las alternativas seleccionadas se desarrollaron cubicaciones preliminares mediante Civil 3D, se utilizaron antecedentes de caudal y cotas provenientes de la modelación hidráulica del Canal Buzeta en HEC-RAS, y se evaluaron escenarios de operación bajo distintos niveles de prorrata. Asimismo, se estimaron costos de inversión, impulsión, conducción, impermeabilización y sistemas fotovoltaicos, complementados con una evaluación económica y social preliminar.

Los resultados muestran que la acumulación lateral puede constituir una alternativa de regulación distribuida para almacenar temporalmente caudales disponibles y mejorar la oportunidad de entrega durante turnos críticos. Sin embargo, la conveniencia de cada alternativa depende fuertemente de la relación entre volumen útil, movimiento de tierra, desnivel respecto del canal, necesidad de bombeo, caudal efectivamente derivable y superficie agrícola beneficiada. Los indicadores económicos obtenidos deben interpretarse como una aproximación de prefactibilidad, debido a la necesidad de validar los antecedentes productivos, prediales, geotécnicos y operacionales de cada sitio.

Se concluye que no corresponde avanzar simultáneamente con los quince tranques identificados. Se recomienda priorizar un grupo reducido de alternativas técnicamente favorables y desarrollar una prefactibilidad avanzada, seguida de un piloto instrumentado que permita verificar la operación real, los beneficios agrícolas y la factibilidad de replicar el modelo en otros sistemas de riego de la Región de Coquimbo.

Palabras clave: acumulación lateral, Canal Buzeta, prorrata, turnos de riego, regulación hídrica, escasez hídrica, Región de Coquimbo.

ABSTRACT

This thesis evaluates the applicability of a lateral storage model to improve water distribution in the Buzeta Canal, Choapa River basin, Coquimbo Region, Chile, under water scarcity conditions, proportional allocation rules, and restricted irrigation turns. The study addresses the limited intermediate regulation capacity of the system, the canal's length, and the reduction in effective water availability for users.

The methodology integrated territorial, topographic, hydraulic, operational, regulatory, and socio-economic information. Fifteen potential sites located in ravines or lateral areas close to the canal were identified. A preliminary screening was applied considering off-stream location, dam height, storage capacity, connection to the canal, filling and release feasibility, pumping requirements, and territorial constraints. Preliminary earthwork and storage estimates were developed for selected alternatives using Civil 3D. Hydraulic flow and elevation data from the Buzeta Canal HEC-RAS model were used to assess operational scenarios under different proportional water allocation levels. Investment, pumping, conveyance, lining, and photovoltaic system costs were also estimated, together with a preliminary economic and social assessment.

The results indicate that lateral storage may provide a distributed regulation alternative by temporarily storing available flows and improving water delivery during critical irrigation turns. However, the suitability of each alternative strongly depends on the relationship between useful storage volume, earthworks, elevation difference from the canal, pumping needs, effectively divertible flow, and the agricultural area supported. The economic indicators must be interpreted as preliminary feasibility estimates, since productive, land ownership, geotechnical, and operational information still requires validation for each site.

The study concludes that the fifteen identified reservoirs should not be developed simultaneously. Instead, a reduced number of technically favorable alternatives should be prioritized for advanced prefeasibility studies, followed by an instrumented pilot project to verify actual operation, agricultural benefits, and the potential replication of the model in other irrigation systems in the Coquimbo Region.

Keywords: lateral storage, Buzeta Canal, proportional water allocation, irrigation turns, water regulation, water scarcity, Coquimbo Region.

INDICE

1	INTRODUCCION.....	11
2	ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO.....	12
3	OBJETIVOS	15
3.1	OBJETIVO GENERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4	ESTADO DEL ARTE.....	17
4.1	ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE	18
4.2	SUJETO DE ESTUDIO	21
4.3	MARCO TEÓRICO DEL ESTADO DEL ARTE.....	27
5	PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO	31
5.1	ETAPA 1. ANTECEDENTES TÉCNICOS DEL ESTADO DEL ARTE.....	32
5.2	ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DEL SUJETO DE ESTUDIO	33
5.3	ETAPA 3. DEFINICIÓN DEL MARCO TEÓRICO Y CRITERIOS NORMATIVOS	33
5.4	ETAPA 4. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS INTEGRADA	34
5.5	ETAPA 5. PRESELECCIÓN MEDIANTE FILTRO TÉCNICO-NORMATIVO	34
5.6	ETAPA 6. DEFINICIÓN DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y MODELACIÓN	35
5.7	ETAPA 7. DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPERACIONALES	35
5.8	ETAPA 8. ESTIMACIÓN DE COSTOS PRIVADOS DE INVERSIÓN	36
5.9	ETAPA 9. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN, MANTENCIÓN Y SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	39
5.10	ETAPA 10. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL	40
5.11	ETAPA 11. INTEGRACIÓN, PRIORIZACIÓN Y RECOMENDACIONES APLICADAS ..	43
6	APLICACIÓN METODOLÓGICA.....	46
6.1	ESTRUCTURA GENERAL DE LA APLICACIÓN	46
6.2	CONSOLIDACIÓN DE LA BASE TÉCNICA DE LOS 15 TRANQUES	47
6.3	SECTORIZACIÓN HIDRÁULICA Y SOLAR.....	49
6.4	CUBICACIÓN Y CANTIDADES FÍSICAS DE LAS OBRAS	50
6.5	CAUDAL DE OPERACIÓN ADOPTADO	50
6.6	PREDIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS Y PÉRDIDAS DE CARGA.....	52
6.7	ALTURA MANOMÉTRICA Y POTENCIA DE BOMBEO	52
6.8	RECURSO SOLAR Y SIMULACIÓN HORARIA	53
6.9	DIMENSIONAMIENTO DEL CAMPO FOTOVOLTAICO.....	54
6.10	COSTO DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN FOTOVOLTAICA.....	55

6.11	COSTO DE OPERACIÓN POR TEMPORADA.....	55
6.12	COSTOS CIVILES, IMPERMEABILIZACIÓN Y TUBERÍAS	57
6.13	CONSOLIDACIÓN DEL MODELO ECONÓMICO	58
6.14	CONVERSIÓN DE PRECIOS PRIVADOS A PRECIOS SOCIALES	59
6.15	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y PRIORIZACIÓN	60
6.16	LIMITACIONES Y CONTROLES DE CALIDAD	60
6.17	SÍNTESIS DE LA APLICACIÓN METODOLÓGICA.....	61
7	RESULTADOS.....	62
7.1	ALCANCE, TRAZABILIDAD Y CRITERIO DE INTERPRETACIÓN	62
7.2	RESULTADOS FÍSICOS Y GEOMÉTRICOS.....	62
7.3	RESULTADOS DE OPERACIÓN BAJO ESCENARIOS DE PRORRATA.....	64
7.4	RESULTADOS DE IMPULSIÓN Y SISTEMA FOTOVOLTAICO	66
7.5	COSTOS PRIVADOS DE INVERSIÓN	66
7.6	CONVERSIÓN A PRECIOS SOCIALES	68
7.7	BENEFICIOS AGRÍCOLAS Y SUPERFICIE EQUIVALENTE.....	68
7.8	FLUJO SOCIAL Y RENTABILIDAD A 30 AÑOS	69
7.9	COSTO POR M ³ DE CAPACIDAD Y POR M ³ REGULADO	71
7.10	SENSIBILIDAD Y PUNTO DE EQUILIBRIO	72
7.11	PRIORIZACIÓN INTEGRADA DE ALTERNATIVAS.....	73
7.12	VINCULACIÓN CON EL LIBRO EXCEL	75
7.13	SÍNTESIS DE RESULTADOS	75
8	CONCLUSIONES.....	76
8.1	CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO GENERAL	76
8.2	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS	76
8.3	CONCLUSIONES TÉCNICAS E HIDRÁULICAS	78
8.4	CONCLUSIONES OPERACIONALES Y DE GESTIÓN DEL AGUA	79
8.5	CONCLUSIONES ENERGÉTICAS Y CONSTRUCTIVAS	79
8.6	CONCLUSIONES ECONÓMICAS Y SOCIALES	80
8.7	CONCLUSIONES NORMATIVAS, AMBIENTALES Y TERRITORIALES	80
8.8	APORTE ORIGINAL Y RESPUESTA AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	81
8.9	CONCLUSIÓN PROFESIONAL Y VALÓRICA.....	81
9	RECOMENDACIONES	82
9.1	RECOMENDACIONES PROFESIONALES	82
9.2	RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN TÉCNICA.....	83
9.3	RECOMENDACIONES DE PRIORIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	84
9.4	RECOMENDACIONES INSTITUCIONALES Y DE GESTIÓN	85
9.5	RECOMENDACIONES ECONÓMICAS Y FINANCIERAS	85

9.6	RECOMENDACIONES POR ESCENARIO TEMPORAL.....	86
9.7	RECOMENDACIONES PERSONALES Y ÉTICAS.....	87
9.8	RECOMENDACIÓN FINAL	87
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
11	LISTADO DE ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	91
12	ANEXOS	93
12.1	Anexo 1. Fichas de clases del Magíster aplicadas a la investigación	93
12.2	Anexo 2. Fichas de lecturas complementarias aplicadas a la investigación	93
12.3	Anexo 3. Certificado de prorratas del río Choapa, periodo 2020–2025	93
12.4	Anexo 4. Extracto del DT-18: precios unitarios utilizados en la evaluación	93
12.5	Anexo 5. Modelo técnico, hidráulico, fotovoltaico y económico de los 15 tranques.....	93
12.6	Anexo 6. Informes y registros del Explorador Solar a los tres sectores.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características y fundamentos de la idea de tesina	13
Tabla 2	Distribución histórica de prorratas del Canal Buzeta, periodo 2020–2025.....	25
Tabla 3	Escenarios metodológicos propuestos	36
Tabla 4	Estructura metodológica del presupuesto privado	37
Tabla 5	Componentes del costo de ciclo de vida	40
Tabla 6	Variables de la evaluación económica y social.....	42
Tabla 7	Indicadores de comparación integrada.....	43
Tabla 8	Matriz resumen de la propuesta metodológica ajustada.....	44
Tabla 9	Programación metodológica ajustada	45
Tabla 10	Secuencia efectiva de la aplicación metodológica.....	46
Tabla 11	Campos y fuente de trazabilidad de la matriz consolidada	48
Tabla 12	Sectores hidráulicos de referencia del Canal Buzeta	49
Tabla 13	Productos de la cubicación utilizados en costos.....	50
Tabla 14	Parámetros de control del reporte fotovoltaico representativo	53
Tabla 15	Criterios de aceptación del sistema fotovoltaico	54
Tabla 16	Supuestos de costo del módulo fotovoltaico.....	55
Tabla 17	Costo probable de elevación fotovoltaica por temporada	56
Tabla 18	Supuestos económicos consolidados de prefactibilidad	57
Tabla 19	Control agregado de consistencia del modelo aplicado.....	58
Tabla 20	Parámetros sociales utilizados para el año 2026.....	59

Tabla 21 Variables sometidas a sensibilidad	60
Tabla 22 Limitaciones de la aplicación y medida de control	60
Tabla 23 Resultados físicos consolidados de los 15 tranques.	63
Tabla 24 Resultados operacionales del escenario crítico.....	64
Tabla 25 Composición del CAPEX privado formulado.	67
Tabla 26 Indicadores económico-sociales por tranque en el escenario crítico.	69
Tabla 27 Indicadores de costo por m ³ en el escenario crítico.....	71
Tabla 28 Sensibilidad individual del escenario crítico.....	73
Tabla 29 Priorización integrada preliminar	74
Tabla 30 Limitaciones y controles para avanzar a factibilidad.....	74
Tabla 31 Cumplimiento de los objetivos específicos	77
Tabla 32 Antecedentes mínimos para avanzar desde prefactibilidad	83
Tabla 33 Priorización preliminar para profundizar estudios	84
Tabla 34 Ruta temporal de implementación.....	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Perdidas v/s Kilometraje canal.....	24
Gráfico 2 Comparación de escenarios de prorrata	65
Gráfico 3 Composición del CAPEX privado formulado.....	67
Gráfico 4 Relación beneficio/costo individual en el escenario crítico.....	70
Gráfico 5 Costo anual equivalente por m ³ regulado.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del Estudio	21
Figura 2 Ubicación principales pérdidas.....	23
Figura 3 Evolución del modelo teórico de la investigación	31
Figura 4 Identificación preliminar de sitios de acumulación y trazado del Canal Buzeta sector El Tambo.....	48
Figura 5 Ejemplo de modelación preliminar del vaso y muro de tranque en Civil 3D	51

1 INTRODUCCION

La cuenca del río Choapa se desarrolla en un territorio semiárido sometido a una alta variabilidad hidrológica y a una disminución prolongada de la disponibilidad de agua para riego. En este contexto, la distribución del recurso no depende únicamente del caudal existente en la fuente, sino también de la capacidad de la infraestructura y de las organizaciones de usuarios para conducir, regular y entregar el agua en el momento en que los cultivos la requieren.

El Canal Buzeta constituye una infraestructura estratégica para la actividad agrícola de la provincia del Choapa. Su longitud, la diversidad de obras asociadas, las pérdidas de conducción y la operación mediante prorrata y turnos generan un sistema complejo, especialmente vulnerable durante los periodos de escasez. Cuando el caudal disponible disminuye, los usuarios enfrentan intervalos más extensos entre riegos, menor flexibilidad de operación y una reducción de la disponibilidad efectiva en los puntos de uso.

La presente tesina evalúa la aplicabilidad de acumuladores laterales de menor escala, preferentemente emplazados fuera de cauce natural, como mecanismo de regulación intermedia vinculado al canal. La alternativa busca almacenar temporalmente parte del caudal disponible y utilizarlo posteriormente para reforzar o extender turnos críticos. La propuesta no crea una nueva fuente de agua ni reemplaza las mejoras requeridas en la conducción; su función es desacoplar parcialmente la oferta instantánea del canal de la demanda puntual de los usuarios.

El estudio integra antecedentes territoriales, topográficos, hidráulicos, operacionales, normativos y económico-sociales. Se identifican quince sitios potenciales, se aplica un filtro de volumen y altura, se cubicaron preliminarmente cinco tranques mediante Civil 3D, se relacionaron con la sectorización del Canal Buzeta y se evaluaron escenarios de llenado, vaciado y operación bajo distintos niveles de prorrata. Además, se incorpora una evaluación económico-social de prefactibilidad basada en el enfoque incremental con y sin proyecto, indicadores de costo-efectividad y una matriz de conveniencia.

El alcance corresponde a una evaluación preliminar. Por ello, los resultados permiten jerarquizar alternativas y definir las condiciones necesarias para continuar a una prefactibilidad más detallada, pero no sustituyen la topografía de precisión, el diseño hidráulico definitivo, los estudios geotécnicos, la validación predial ni la evaluación social completa mediante las planillas oficiales aplicables a proyectos de riego.

2 ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO

La idea de esta tesina surge a partir de la observación crítica de una problemática concreta y persistente en la gestión del agua de riego en la cuenca del río Choapa, particularmente en el funcionamiento del Canal Buzeta. En un contexto de escasez hídrica prolongada, la operación de este canal se ha visto fuertemente restringida por la menor disponibilidad del recurso, por la aplicación de decretos de escasez y por el régimen de prorrata implementado para distribuir caudales insuficientes entre los usuarios. Esta situación ha derivado en turnos de riego cada vez más limitados, con impactos directos sobre la continuidad de las actividades agrícolas y sobre la eficiencia del sistema de distribución.

Frente a este escenario, la propuesta de evaluar un modelo de acumulación lateral adyacentes al canal constituye una idea original, en cuanto plantea una alternativa de regulación y almacenamiento que no ha sido analizada previamente de manera específica para este sistema. La propuesta no se limita a describir el problema, sino que busca desarrollar una respuesta técnica aplicada, basada en la utilización de espacios laterales con potencial de almacenamiento temporal, permitiendo captar caudales en períodos de baja demanda y regular su entrega durante los turnos de riego. Su carácter original radica, por tanto, en vincular una necesidad real del territorio con una solución técnicamente factible, adaptable a la infraestructura existente y orientada a mejorar la gestión operativa del recurso hídrico bajo condiciones de restricción.

A partir de los antecedentes expuestos, el origen de la tesina responde tanto a una problemática concreta observada en la operación del Canal Buzeta como a la necesidad de formular una alternativa técnicamente aplicable y coherente con los objetivos del Magíster en Gestión del Agua. En este contexto, la **Tabla 1** sintetiza los principales atributos que fundamentan la elección del tema, considerando su originalidad, motivación, factibilidad de desarrollo, vinculación con la gestión del recurso hídrico y utilidad desde la perspectiva profesional.

Tabla 1 Características y fundamentos de la idea de tesina

CARACTERÍSTICAS DE LA IDEA DE LA TESINA	EXPLICACIÓN
Porque es una idea ORIGINAL , que es propia del alumno	Frente a la creciente problemática de escasez hídrica que afecta a la cuenca del río Choapa, la operación del Canal Buzeta, una infraestructura de más de 90 kilómetros se ha visto severamente limitada por los decretos de restricción y por la aplicación del régimen de prorrata implementado por la Junta de Vigilancia, reduciendo la disponibilidad efectiva del recurso y generando turnos de riego altamente restringidos. En este contexto, se plantea un modelo innovador de acumulación lateral que aprovecha quebradas cercanas al canal para almacenar caudales en períodos de baja demanda y regular su entrega durante los turnos. Aunque esta alternativa no ha sido evaluada previamente, su viabilidad se respalda en el diagnóstico existente, el cual evidencia pérdidas relevantes, restricciones operativas y la necesidad urgente de optimizar la distribución del agua. De este modo, la propuesta surge como una solución aplicable y pertinente para mejorar la gestión hídrica del sistema bajo escenarios de escasez creciente.
Motivos personales o profesionales MOTIVACION por desarrollar el tema	La motivación surge de la experiencia profesional desarrollada en la Comisión Nacional de Riego (CNR), así como del trabajo directo con Juntas de Vigilancia (JV) y comunidades agrícolas de la Región de Coquimbo, donde se observa la vulnerabilidad que enfrentan los agricultores ante la disminución del recurso hídrico. En contextos de escasez, muchos usuarios reciben turnos de apenas 3 horas cada 7 a 15 días, situación que dificulta la planificación agrícola, reduce la productividad y agrava las brechas de acceso al agua. Esta realidad ha permitido comprender de primera fuente las tensiones entre la normativa, la operación técnica y las necesidades reales de los usuarios. A nivel personal, existe un fuerte compromiso con aportar soluciones que integren ingeniería hidráulica, gobernanza y uso eficiente del recurso. La posibilidad de diseñar y evaluar una alternativa concreta para mejorar la seguridad hídrica del territorio constituye un desafío profesional significativo y una oportunidad para contribuir a avanzar hacia una gestión más equitativa, resiliente y sostenible.
Objetivo es posible de lograr es un tema REALISTA o aplicado	El objetivo es posible de realizar, porque se cuenta con Catastro de usuarios, identificación de la infraestructura del canal, y lugares propicios para generar la acumulación lateral, lo cual permitirá mejorar los tiempos de turno del canal
Atractivo tema para la Gestión del Agua VINCULADO con el objetivo del magister del agua	La propuesta de mejorar los turnos de los agricultores es un tema vinculado al Magister MWM porque está orientado a contribuir al desarrollo y mejoramiento de la gestión del recurso hídrico, desde una perspectiva multidisciplinaria, teórica y aplicada

CARACTERÍSTICAS DE LA IDEA DE LA TESINA	EXPLICACIÓN
El problema investigado servirá para RESOLVER un tema aplicado desde la PERSPECTIVA PROFESIONAL	El análisis permitirá generar una propuesta concreta para la OUA (Organización de Usuario de Aguas) del canal Buzeta, ofreciendo una estrategia que mejore la seguridad y estabilidad de los turnos de riego. Desde la perspectiva profesional, un sistema de acumulación lateral aporta eficiencia operativa: permite almacenar el caudal cuando no hay demanda, reducir pérdidas por conducción, evitar desbordes y mejorar la entrega efectiva del agua a usuarios con turnos críticos. La metodología puede replicarse en otros canales de la región. Esta tesis serviría como insumo para un futuro proyecto CNR o una intervención público–privada de optimización.

Fuente: elaboración propia

3 OBJETIVOS

Este estudio enfrenta el desafío de evaluar la aplicabilidad de un modelo de acumulación lateral en el Canal Buzeta, como alternativa para mejorar la regulación y distribución del recurso hídrico bajo condiciones de escasez, prorrata y turnos de riego restringidos.

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicabilidad de un modelo de acumulación lateral en el Canal Buzeta, de la cuenca del río Choapa, bajo condiciones de escasez hídrica, mediante el análisis de alternativas de almacenamiento. Con el fin de determinar su optimización de disponibilidad del recurso hídrico y la mejora de la eficiencia de distribución entre los usuarios.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar y analizar los antecedentes técnicos y experiencias relacionadas con sistemas de acumulación y regulación de caudales en canales de riego.
2. Aplicar los conocimientos teóricos y metodológicos de las distintas asignaturas del magíster, para el desarrollo y evaluación un modelo de acumulación lateral.
3. Caracterizar el sistema hidráulico y operativo del Canal Buzeta bajo condiciones de escasez hídrica y prorrata, identificando sus principales restricciones en la distribución del recurso.
4. Establecer los criterios técnicos, hidráulicos, operacionales y normativos que permitan evaluar alternativas de acumulación lateral en sistemas de riego, considerando como condición de análisis obras de altura inferior a 7 metros y volumen inferior a 150.000 m³, preferentemente emplazadas fuera de cauce natural.
5. Generar una base de datos integrada del Canal Buzeta, incorporando información topográfica, trazado del canal, imágenes satelitales, áreas de riego por temporada, sectores con pérdidas, obras existentes, quebradas laterales, régimen de prorrata y turnos de riego.
6. Incorporar un filtro técnico-normativo para la preselección de alternativas de acumulación lateral, verificando altura estimada de muro, volumen potencial de almacenamiento, condición de emplazamiento fuera de cauce natural, relación con el canal existente y restricciones asociadas a la legislación vigente.
7. Establecer herramientas de análisis y modelación para el procesamiento de información topográfica, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, curvas altura-volumen y simulación hidráulica del Canal Buzeta.

8. Aplicar herramientas de análisis hidráulico, territorial y normativo sobre la base de datos del Canal Buzeta, con el fin de simular el comportamiento del sistema bajo escenarios de prorrata, turnos de riego y operación con acumuladores laterales de menor escala.
9. Determinar sectores potenciales para la localización de acumuladores laterales en el Canal Buzeta, estimando para cada alternativa su volumen de almacenamiento, altura aproximada de muro, factibilidad de conexión hidráulica, condición normativa y aporte esperado a la regulación de caudales.
10. Comparar el comportamiento del sistema del Canal Buzeta bajo escenarios sin acumulación lateral y con acumulación lateral, evaluando su efecto sobre la disponibilidad efectiva del recurso hídrico, la oportunidad de entrega en turnos de riego y la eficiencia operacional del sistema.
11. Evaluar la aplicabilidad técnica, operacional, económica, ambiental y normativa del modelo de acumulación lateral propuesto, considerando sus beneficios, restricciones, riesgos y condiciones mínimas para su implementación en el Canal Buzeta.
12. Proponer recomendaciones aplicadas para la adopción de acumuladores laterales de menor escala como medida de adaptación frente a escenarios de escasez hídrica, prorrata y baja capacidad de regulación en sistemas de riego de la Región de Coquimbo.

4 ESTADO DEL ARTE

La problemática de la escasez hídrica ha generado un creciente interés por desarrollar estrategias que permitan mejorar la gestión, regulación y distribución del agua en sistemas de riego, especialmente en zonas semiáridas. La literatura especializada ha señalado que la disminución de la oferta hídrica, sumada a una mayor variabilidad climática, afecta no solo la disponibilidad física del recurso, sino también la capacidad de los sistemas de conducción para responder de manera eficiente a las demandas agrícolas.

En el ámbito de los canales de riego, diversos estudios han mostrado que la operación bajo esquemas de turnos y prorrata, si bien constituye una respuesta habitual frente a escenarios de restricción, presenta limitaciones relevantes en términos de oportunidad, flexibilidad y eficiencia de entrega. Estas dificultades se intensifican en canales extensos o con escasa infraestructura de regulación intermedia, donde las pérdidas de conducción y la imposibilidad de adecuar caudales a la demanda real reducen la disponibilidad efectiva para los usuarios.

Frente a ello, la infraestructura de almacenamiento y regulación ha sido reconocida como una herramienta clave de adaptación. Tradicionalmente, el énfasis se ha concentrado en embalses y grandes obras de acumulación; sin embargo, en los últimos años ha aumentado el interés por soluciones de menor escala, orientadas a mejorar la gestión local del recurso mediante almacenamiento temporal, regulación distribuida y aprovechamiento de condiciones topográficas favorables.

Entre estas alternativas, destacan los enfoques de acumulación fuera de cauce y de regulación lateral, que permiten almacenar agua en sectores adyacentes a la conducción principal para su posterior uso en momentos de mayor demanda o restricción. Estas soluciones presentan ventajas potenciales en términos de flexibilidad operativa, adaptación territorial y menor intervención sobre la infraestructura troncal. No obstante, su aplicación específica en canales sometidos a prorrata y distribución por turnos aún ha sido escasamente estudiada, particularmente en el contexto chileno.

A su vez, la modelación hidrológica e hidráulica se ha consolidado como una herramienta fundamental para analizar la factibilidad de este tipo de alternativas, permitiendo simular escenarios de disponibilidad, operación y almacenamiento, así como estimar sus efectos sobre la eficiencia de distribución. En este sentido, el uso de modelos aplicados a casos concretos resulta especialmente relevante para respaldar decisiones de gestión e inversión en territorios afectados por escasez hídrica.

En consecuencia, se identifica una brecha de conocimiento respecto de la evaluación integrada de modelos de acumulación lateral en quebradas cercanas a canales de riego existentes, bajo condiciones reales de restricción hídrica y prorrata.

La presente investigación busca contribuir a cerrar esta brecha mediante el análisis del Canal Buzeta, en la cuenca del río Choapa, evaluando la aplicabilidad de esta alternativa como mecanismo para optimizar la disponibilidad efectiva del recurso y mejorar la eficiencia de su distribución entre usuarios.

4.1 ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE

Los antecedentes del estado del arte de la investigación se construyen a partir de una revisión bibliográfica y técnica orientada específicamente al problema de estudio: la gestión y distribución del recurso hídrico en canales de riego bajo condiciones de escasez, prorrata y restricciones operativas, con especial interés en la evaluación de alternativas de acumulación lateral vinculadas a la infraestructura existente. Para ello, se revisó un corpus de 47 lecturas, compuesto por 27 fichas derivadas de clases y materiales del programa de Magíster en Water Management y 20 lecturas complementarias provenientes de papers y estudios especializados, seleccionados por su relación con la planificación hídrica, la modelación hidrológica e hidráulica, la eficiencia de distribución, la gobernanza del agua y las alternativas de almacenamiento y regulación en sistemas de riego (Martín-Vide, 2024; Suárez, 2024; Trujillo, 2024; Flores, 2024; Carvallo, 2024) . Las fichas de sistematización correspondientes a los materiales de clases y a las lecturas complementarias se presentan, respectivamente, en los Anexos 1 y 2.

La revisión permitió constatar que la literatura científica y técnica ha abordado ampliamente la problemática de la escasez hídrica en zonas semiáridas, destacando sus efectos sobre la disponibilidad de agua para riego, la seguridad hídrica y la creciente presión sobre los sistemas de distribución. En particular, los materiales relativos a planificación de recursos hídricos, cambio climático y gestión por cuencas coinciden en que la disminución de caudales, la mayor variabilidad climática y la intensificación de eventos de sequía obligan a replantear la forma en que se planifican y operan los sistemas de riego (Martín-Vide, 2024; CR2, 2023; van Vliet & Kok, 2013).

Desde una perspectiva temática, el material revisado permite identificar al menos cuatro grandes líneas de desarrollo. La primera corresponde a la evaluación de recursos hídricos, donde destacan la percepción remota, los sistemas de información geográfica, los modelos digitales de elevación y la modelación hidrológica como herramientas para caracterizar cuencas, estimar caudales y analizar escenarios de disponibilidad. La segunda línea se relaciona con la planificación y gobernanza del agua, enfatizando que la disponibilidad hídrica no depende solo de factores físicos, sino también de la organización institucional, las reglas de distribución, la gestión por cuencas y la coordinación entre usuarios (Martín-Vide, 2024; Why Plan?; Water Governance in Chile). La tercera línea corresponde a la operación de canales y programación del riego, donde se analizan la sincronización entre oferta y demanda, la distribución de caudales, la eficiencia del sistema y la evaluación de escenarios bajo restricciones hidráulicas y

operacionales (Zhang et al., 2022; Liu et al., 2019; Sun et al., 2020; Chen et al., 2017). Finalmente, una cuarta línea revisa el rol del almacenamiento, la regulación y la mejora continua, aportando criterios para analizar alternativas de acumulación, reducción de pérdidas y optimización del desempeño del sistema (Brauman et al., 2015; Carvallo, 2024; Juran, 1986; Ishikawa, s. f.).

A partir de esta revisión puede afirmarse que hoy existe conocimiento robusto sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas, la planificación del agua bajo incertidumbre, la programación de riego, la distribución en canales y los mecanismos de regulación del recurso. Sin embargo, también se observa que estos enfoques suelen desarrollarse de manera fragmentada. Algunos estudios se concentran en la optimización de turnos o en la sincronización entre oferta y demanda de agua (Zhang et al., 2022; Sun et al., 2020), otros en la modelación hidráulica y la optimización de la distribución del sistema (Liu et al., 2019; Wang et al., 2020; Chen et al., 2017), mientras que otros ponen el énfasis en el almacenamiento, la planificación adaptativa o la gobernanza del recurso (Brauman et al., 2015; Martín-Vide, 2024; CR2, 2023). No obstante, la integración entre operación real del canal, condiciones de prorrata, pérdidas de conducción, restricciones territoriales y soluciones de acumulación lateral asociadas a quebradas cercanas al canal continúa siendo limitada, lo que evidencia una brecha de conocimiento desde una perspectiva sistémica e integrada.

En cuanto a las tendencias del estado del arte, la revisión permite reconocer una transición desde enfoques centrados principalmente en grandes obras de regulación hacia soluciones más flexibles, descentralizadas y adaptativas. Esta tendencia se expresa, por una parte, en el uso creciente de modelos de simulación y optimización para representar escenarios de operación y distribución del agua (Liu et al., 2019; Wang et al., 2020; Torres-Bejarano et al., 2016); por otra, en la valoración de estrategias que permitan responder a la variabilidad espacial y temporal de la demanda y a contextos de escasez hídrica estructural (Sun et al., 2020; van Vliet & Kok, 2013; CR2, 2023). Del mismo modo, varios trabajos insisten en que la eficiencia ya no puede entenderse únicamente como un problema físico de conducción, sino también como un problema de gestión, control, reducción de pérdidas y mejora continua del sistema.

Respecto del estado actual del problema investigado, la revisión indica que, en Chile, y particularmente en zonas semiáridas como la Región de Coquimbo, la gestión del recurso hídrico en canales de riego se desarrolla bajo condiciones de creciente restricción, asociadas a escasez estructural, variabilidad climática, decretos de escasez y mecanismos de distribución por prorrata. En sistemas como el Canal Buzeta, ello se expresa en reducción de caudales disponibles, turnos de riego más restringidos, dificultades para asegurar la oportunidad de entrega y pérdidas significativas a lo largo de la conducción. Si bien la literatura revisada entrega herramientas para diagnosticar estas limitaciones y analizar su comportamiento, las soluciones estudiadas no siempre han abordado de manera

suficiente la incorporación de almacenamiento intermedio o acumulación lateral como mecanismo para mejorar la flexibilidad operacional y la continuidad del suministro (Martín-Vide, 2024; Causapé et al., 2004; Vos & Vincent, 2011; Brauman et al., 2015).

Asimismo, el corpus revisado permitió identificar los conceptos clave que estructuran esta investigación: escasez hídrica, prorrata, turnos de riego, disponibilidad efectiva, eficiencia de conducción, regulación hídrica, acumulación lateral, modelación hidrológica y modelación hidráulica. Estos conceptos permiten articular el problema desde una perspectiva técnica y operativa, y al mismo tiempo vincular la dimensión territorial, institucional y de gestión con la evaluación de alternativas de intervención (Flores, 2024; Martín-Vide, 2024; Chen et al., 2017; Liu et al., 2019).

En términos metodológicos, los antecedentes revisados muestran que los estudios similares se apoyan principalmente en modelos hidrológicos para estimación de caudales, modelos hidráulicos para representar la conducción y distribución en canales, simulaciones de escenarios con y sin intervención, análisis de eficiencia del sistema, evaluación multicriterio para localización de infraestructura y estudios de caso desarrollados en sistemas reales de riego bajo condiciones de escasez. Dentro de las lecturas complementarias seleccionadas, destacan aquellas que analizan programación adaptable del riego, distribución y scheduling en canales, modelación acoplada entre hidráulica y optimización, simulación multiobjetivo del desempeño del sistema y casos reales de control o distribución en sistemas abiertos con múltiples usuarios, por cuanto presentan mayor cercanía conceptual y metodológica con la situación del Canal Buzeta (Amini et al., 2021; Liu et al., 2019; Wang et al., 2020; Sun et al., 2020; Chen et al., 2017; Vos & Vincent, 2011).

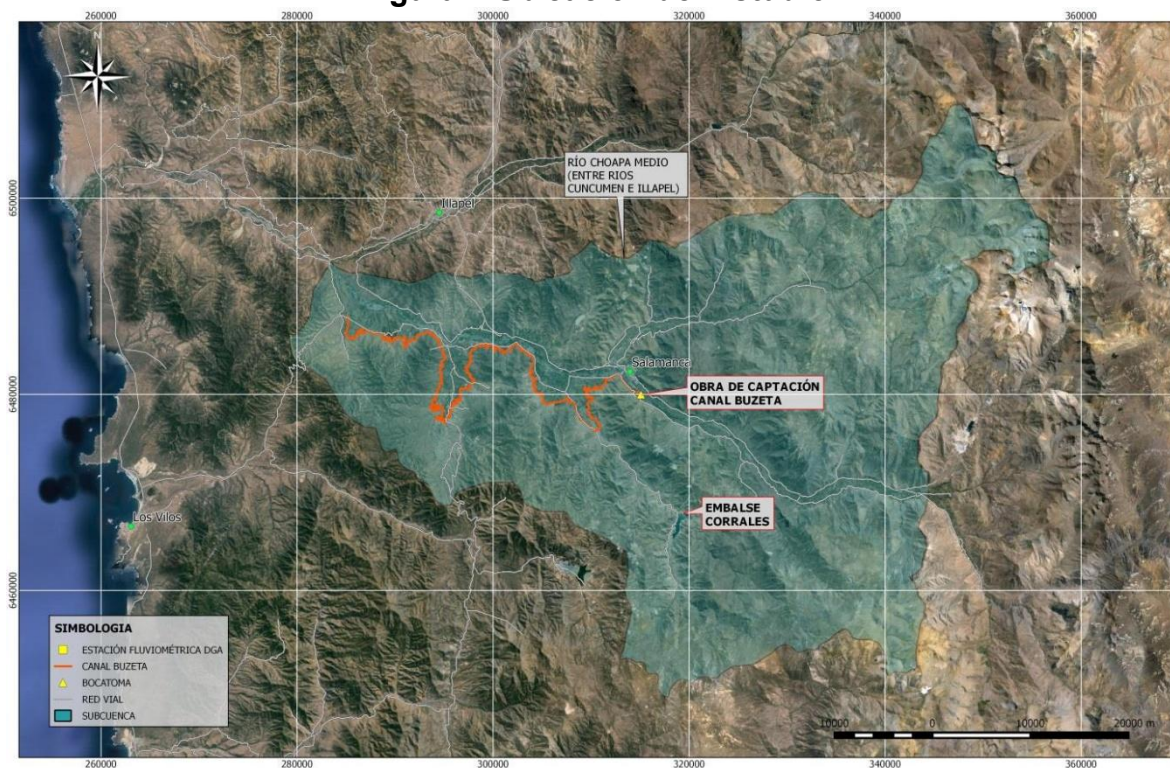
En consecuencia, el estado del arte construido a partir de estas 47 lecturas permite sostener que existe una base robusta de conocimiento sobre escasez hídrica, planificación del agua, operación de canales, modelación hidrológica e hidráulica, eficiencia de distribución y alternativas de regulación. Sin embargo, también permite afirmar que persiste una brecha específica en la evaluación integrada de modelos de acumulación lateral en quebradas o sectores adyacentes a canales existentes, especialmente bajo condiciones reales de prorrata, turnos de riego y restricciones de conducción. En este sentido, la presente investigación se posiciona como un estudio aplicado que busca articular el conocimiento revisado y aportar evidencia sobre la aplicabilidad de un modelo de acumulación lateral en el Canal Buzeta, como alternativa orientada a mejorar la disponibilidad efectiva del recurso hídrico y la eficiencia de su distribución.

4.2 SUJETO DE ESTUDIO

El sujeto de estudio de la investigación corresponde al sistema hidráulico y operativo del Canal Buzeta, emplazado en la cuenca del río Choapa, en la Región de Coquimbo. Este canal constituye una de las principales infraestructuras de riego de la provincia, tanto por su extensión que fluctúa entre 91 y 100 km como por su relevancia en la actividad agrícola del territorio, al permitir el abastecimiento de agua a una superficie aproximada de 3.720 hectáreas, distribuidas en sectores tales como El Tambo, Tahuinco, Limáhuida, Los Loros y Las Cañas. En términos de usuarios, el sistema agrupa del orden de 473 a 512 regantes, lo que lo posiciona como un sistema de riego de carácter estructurante dentro de la cuenca.

A continuación, en la **Figura 1**, se presenta la ubicación general del área de estudio, permitiendo contextualizar territorialmente el sistema analizado.

Figura 1 Ubicación del Estudio



Fuente: Elaboración propia

Desde una perspectiva funcional, el Canal Buzeta puede entenderse como un sistema hidráulico lineal de gran escala, cuyo propósito principal es la captación, conducción y distribución del recurso hídrico hacia distintos puntos de demanda agrícola. Este sistema se inicia en una bocatoma ubicada en la ribera izquierda del río Choapa, desde donde el agua es derivada hacia el canal matriz, el cual recorre longitudinalmente el valle siguiendo la topografía natural. A lo largo de su trazado, el canal incorpora una diversidad de obras hidráulicas —incluyendo sifones, túneles,

alcantarillas, canoas, vertederos y compuertas— que permiten sortear obstáculos geográficos, regular caudales y efectuar la entrega del recurso a los usuarios. En total, se han identificado más de 300 estructuras asociadas al sistema, lo que da cuenta de un nivel importante de complejidad operativa y de requerimientos de mantención.

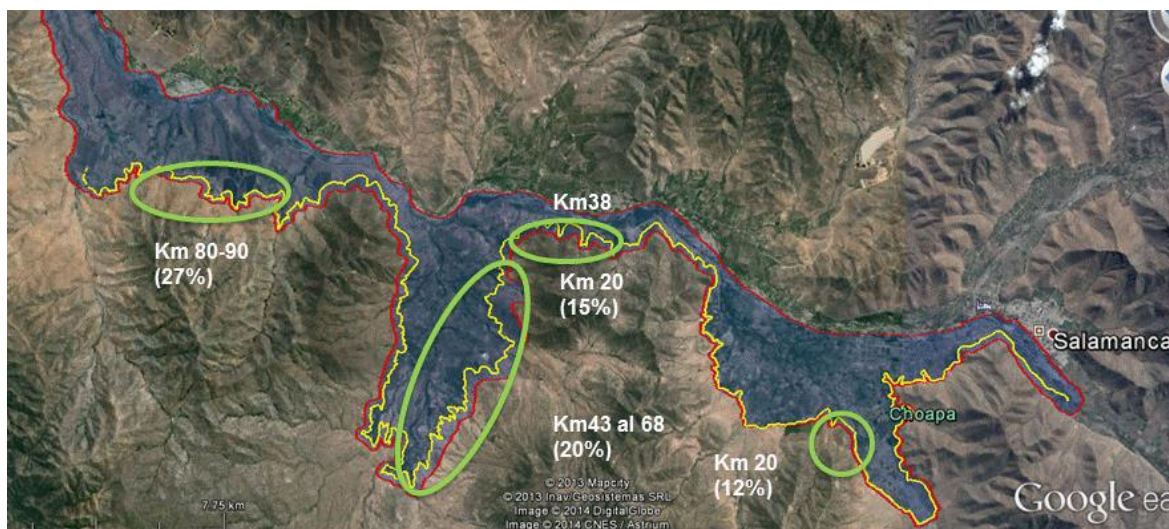
El comportamiento del sistema está fuertemente condicionado por su emplazamiento en un entorno semiárido, caracterizado por una alta variabilidad hidrológica y una marcada dependencia de los aportes del río Choapa. A su vez, el canal interactúa de manera permanente con múltiples quebradas laterales que intersectan su trazado, generando tanto aportes adicionales de caudal en eventos de precipitación como riesgos asociados a desbordes, arrastre de sedimentos y daños estructurales. Esta interacción entre el canal y el medio físico circundante constituye un elemento central para comprender su funcionamiento, particularmente en escenarios de eventos extremos o condiciones de escasez.

En términos hidráulicos, el canal presenta un régimen de operación que, en condiciones normales, permite transportar caudales del orden de 3 m³/s, manteniendo un comportamiento relativamente estable en la mayor parte de su trazado. Sin embargo, se han identificado múltiples puntos críticos donde la capacidad hidráulica resulta insuficiente, generándose desbordes localizados o pérdidas de eficiencia en la conducción. Este comportamiento se ve influido tanto por las características geométricas del canal como por la presencia de singularidades hidráulicas —tales como cambios de sección, obras de arte o condiciones de rugosidad— que afectan el régimen de escurrimiento.

Uno de los aspectos más relevantes que define el sujeto de estudio es el estado actual de su infraestructura. A partir del diagnóstico técnico existente, se observa que una proporción significativa del canal presenta condiciones deficientes, evidenciándose que más del 70% de su longitud corresponde a tramos sin revestimiento, mientras que solo cerca de un 25% cuenta con algún tipo de protección estructural, ya sea en hormigón, mampostería u otros materiales. Esta situación tiene implicancias directas en la eficiencia del sistema, particularmente en términos de pérdidas por infiltración, las cuales alcanzan valores acumulados superiores al 50% del caudal a lo largo del canal, con sectores específicos donde estas pérdidas son significativamente mayores. La magnitud de estas pérdidas no solo refleja deficiencias estructurales, sino también limitaciones históricas en la inversión y mantención del sistema.

La identificación de pérdidas a lo largo del Canal Buzeta constituye un antecedente relevante para comprender las restricciones que afectan la disponibilidad efectiva del recurso en los distintos sectores del sistema. Su representación espacial permite complementar el análisis por kilometraje, reconocer la concentración de tramos problemáticos y relacionarlos con la ubicación de usuarios, obras existentes y potenciales sectores de regulación. En este contexto, la **Figura 2** muestra la localización de las principales pérdidas identificadas en el canal.

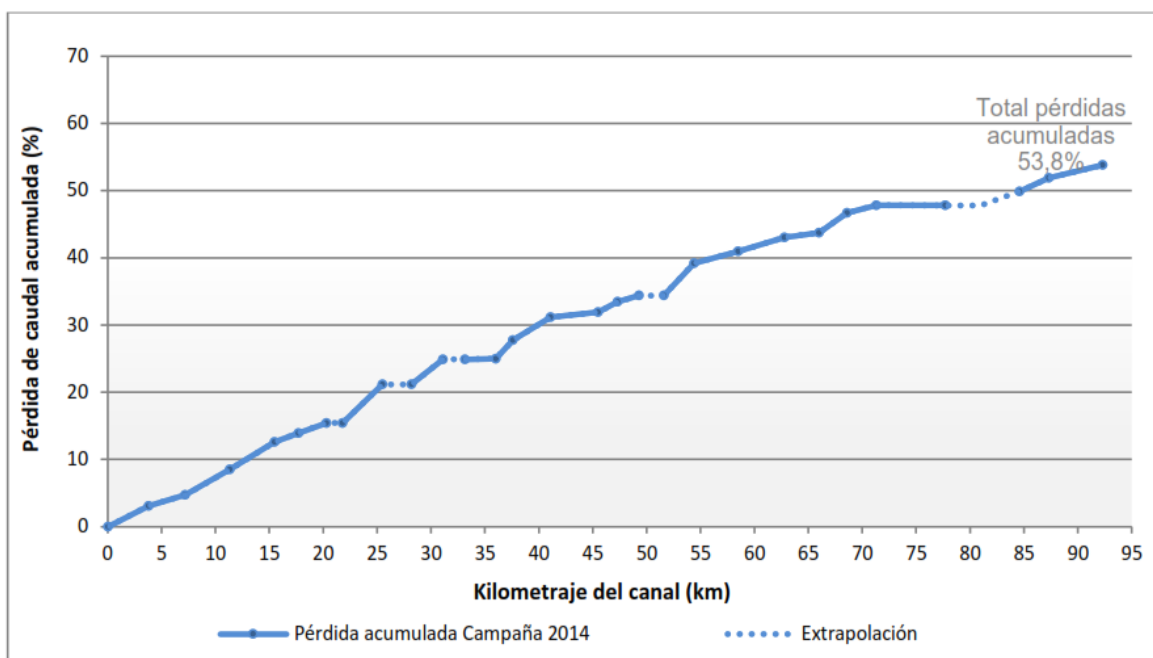
Figura 2 Ubicación principales pérdidas



.Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de caracterizar espacialmente el comportamiento del Canal Buzeta y reconocer los sectores en que la conducción presenta mayores restricciones, se analizaron las pérdidas estimadas a lo largo de su trazado. Esta representación permite relacionar la magnitud de las pérdidas con el kilometraje del canal e identificar los tramos que adquieren mayor relevancia para el diagnóstico del sistema y para la posterior evaluación de alternativas de regulación lateral. A continuación, el **Gráfico 1** presenta la distribución de las pérdidas en función de la progresiva del canal.

Gráfico 1 Pérdidas v/s Kilometraje canal



Fuente: CNR 2018 - Mejoramiento canales Bellavista, Villalón y Buzeta

Desde el punto de vista operacional, el Canal Buzeta funciona bajo un esquema de distribución del recurso basado en turnos de riego, administrado por la organización de usuarios. En condiciones normales, el agua es distribuida semanalmente, mediante la apertura y cierre de compuertas durante periodos definidos según los derechos de cada usuario. No obstante, en contextos de escasez hídrica los cuales se han intensificado en la última década este esquema se ve profundamente afectado, extendiéndose los turnos a intervalos de 8 a 10 días y reduciéndose significativamente los volúmenes disponibles.

En este escenario, la aplicación de prorrata se vuelve una práctica estructural dentro del sistema de gestión del canal, correspondiendo a la asignación proporcional del recurso disponible en función de los derechos de aprovechamiento de cada usuario. Este mecanismo permite ajustar la distribución frente a la disminución de la oferta hídrica, asegurando una entrega equitativa bajo condiciones de restricción, pero al mismo tiempo evidenciando la limitada capacidad del sistema para regular y almacenar agua.

En relación con lo anterior, se dispone de información empírica correspondiente a la distribución de prorratas aplicada por la Junta de Vigilancia del Río Choapa en el periodo 2020–2025, la cual permite caracterizar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación. La prorrata se define como el cociente entre la disponibilidad hídrica efectiva y el total de derechos de aprovechamiento, siendo aplicada de manera dinámica en función de la evolución del recurso disponible. El registro detallado que respalda esta información

se encuentra contenido en el certificado emitido por la Junta de Vigilancia del Río Choapa, incorporado en el Anexo 3.

Con el fin de caracterizar la severidad y variabilidad de las restricciones de operación, la **Tabla 2** presenta la distribución histórica de prorratas del Canal Buzeta durante el período analizado.

Tabla 2 Distribución histórica de prorratas del Canal Buzeta, periodo 2020–2025

Año	Prorrata mínima (%)	Prorrata máxima (%)	Promedio anual (%)	Interpretación
2020	6%	25%	14%	Escenario altamente restrictivo, consistente con una escasez hídrica severa.
2021	6%	20%	13%	Condición restrictiva similar a 2020, con una mejora leve.
2022	3%	45%	18%	Alta variabilidad intra-anual, con episodios puntuales de mayor disponibilidad.
2023	10%	35%	21%	Año de transición, con mejora relativa en la disponibilidad.
2024	10%	100%	38%	Año excepcionalmente favorable, con recuperación del sistema.
2025	12%	75%	32%	Condición intermedia, aunque con variabilidad aún significativa.

Fuente: Elaboración propia a partir de Junta de Vigilancia del Río Choapa (2026); véase Anexo 3.

El análisis de esta información evidencia una alta variabilidad en la disponibilidad hídrica del sistema, observándose periodos con asignaciones altamente restrictivas —con valores cercanos al 6% en los momentos más críticos— así como escenarios de mayor disponibilidad, donde la prorrata alcanza valores significativamente superiores e incluso cercanos al 100% en periodos más favorables. Esta variabilidad refleja la fuerte dependencia del sistema respecto de las condiciones hidrológicas de la cuenca y pone en evidencia la limitada capacidad de regulación del canal frente a escenarios de escasez.

A lo anterior se suman diversas problemáticas asociadas tanto a la operación como a la seguridad física del canal. Entre ellas destacan la presencia de obras en mal estado, compuertas deterioradas, falta de sistemas de medición adecuados, crecimiento de vegetación acuática y deficiencias en la mantención general del sistema. Asimismo, se identifican riesgos relevantes asociados a la estabilidad del canal, tales como deslizamientos de taludes, caída de rocas desde laderas, inestabilidad geotécnica y afectaciones en cruces de quebradas, lo que evidencia un sistema altamente vulnerable frente a condiciones climáticas adversas o eventos extremos.

En este contexto, el Canal Buzeta no solo representa una infraestructura de riego, sino un sistema socio-técnico complejo, donde interactúan variables hidráulicas, geográficas, organizacionales y climáticas, configurando un escenario donde las ineficiencias estructurales y operativas se traducen en una reducción significativa de la disponibilidad efectiva del recurso hídrico. Esta condición se vuelve particularmente crítica en un contexto de cambio climático y megasequía, donde la optimización del uso del agua se vuelve una necesidad urgente.

Por tanto, el análisis de este sistema permite abordar de manera integral la problemática de la gestión del recurso hídrico en condiciones de escasez, constituyéndose en un caso de estudio idóneo para la evaluación de alternativas que permitan mejorar la regulación, almacenamiento y distribución del agua. En este sentido, la incorporación de soluciones como la acumulación lateral en quebradas cercanas al canal surge como una oportunidad relevante, al permitir aprovechar condiciones territoriales existentes para aumentar la disponibilidad del recurso en periodos críticos, reducir la dependencia de la oferta inmediata del río y mejorar la eficiencia global del sistema.

En consecuencia, el sujeto de estudio se configura no solo como una infraestructura física, sino como un sistema dinámico cuya comprensión requiere integrar múltiples dimensiones de análisis, lo que justifica su selección como base para el desarrollo de la presente investigación.

4.3 MARCO TEÓRICO DEL ESTADO DEL ARTE

A partir de los antecedentes revisados, es posible construir un marco teórico que permita comprender de manera integrada las relaciones entre las variables que condicionan la disponibilidad del recurso hídrico en sistemas de riego sometidos a condiciones de escasez. Este marco teórico no debe entenderse únicamente como una recopilación de conceptos, sino como una estructura de análisis que organiza el conocimiento disponible, interpreta el problema de investigación y orienta el desarrollo metodológico del estudio. En este sentido, un modelo teórico corresponde a una representación conceptual que articula ideas, variables, relaciones causales y criterios de análisis, permitiendo explicar un fenómeno y proponer una forma ordenada de abordarlo. Dicho modelo se formula una vez que se ha recopilado, revisado e internalizado la información relevante del tema, tanto desde la bibliografía y las experiencias previas como desde los conocimientos adquiridos en las distintas asignaturas del magíster y la propia comprensión técnica del investigador. Por ello, el modelo teórico no surge de forma aislada, sino cuando existe claridad suficiente sobre el problema, sobre el sujeto de estudio y sobre la secuencia lógica de la investigación expresada en los objetivos específicos.

En el caso de esta tesina, el modelo teórico se estructura a partir de la interacción entre conceptos e ideas clave tales como la escasez hídrica estructural, la prorrata, los turnos de riego, la disponibilidad efectiva, la eficiencia de conducción, la regulación hídrica, la acumulación lateral, la gestión del recurso hídrico, la variabilidad hidrológica, la modelación hidrológica, la simulación de escenarios, el uso de herramientas SIG y DEM para la identificación de quebradas, el análisis de eficiencia y el estudio de series de caudales. Todos estos elementos, que en la figura aparecen asociados al estado del arte, al marco teórico y al conocimiento del sujeto de estudio, constituyen la base conceptual desde la cual se interpreta el funcionamiento del Canal Buzeta bajo condiciones de escasez y prorrata. A ello se suma la comprensión del sujeto de estudio propiamente tal, esto es, el Canal Buzeta como sistema de riego ubicado en la cuenca del río Choapa, con una longitud aproximada de 90 kilómetros, con usuarios agrícolas asociados, operación bajo régimen de prorrata y presencia de quebradas laterales con potencial para una acumulación intermedia.

Desde esta perspectiva, la problemática de investigación no se limita a constatar una menor disponibilidad de agua, sino que se sitúa en la forma en que esa menor disponibilidad afecta la operación del sistema y la entrega efectiva del recurso a los usuarios. En contextos de escasez hídrica, característicos de zonas semiáridas, la reducción sostenida de caudales obliga a distribuir el agua mediante mecanismos de prorrata y turnos de riego. Si bien estos mecanismos permiten repartir el recurso disponible entre los usuarios, también introducen restricciones operativas en la continuidad, oportunidad y flexibilidad de la entrega. Como consecuencia, la disponibilidad efectiva del agua en los puntos de uso puede verse severamente afectada, no solo porque existe menos recurso, sino porque el sistema

carece de la capacidad suficiente para regularlo en el tiempo. De este modo, la gestión del agua en canales de riego deja de ser exclusivamente un problema de cantidad y pasa a transformarse también en un problema de regulación y distribución.

En este contexto, el sistema de riego puede ser representado como un conjunto de relaciones causales entre variables, donde la escasez hídrica condiciona el comportamiento general del sistema. El modelo conceptual del problema de investigación puede expresarse mediante la siguiente secuencia: escasez hídrica, reducción de caudales, aplicación de prorrata, implementación de turnos, restricciones en la entrega, disminución de la disponibilidad efectiva y necesidad de regulación del sistema. Esta cadena permite comprender que la problemática observada no radica únicamente en la falta de agua, sino en la interacción entre una oferta restringida, una operación condicionada por la prorrata y los turnos, y una insuficiente capacidad de regulación intermedia. La figura propuesta da cuenta precisamente de esta lógica, al mostrar que el modelo teórico se construye a partir de conceptos, herramientas y conocimiento del sujeto de estudio, para luego proyectarse hacia una propuesta metodológica, una aplicación metodológica, la generación de resultados y finalmente un modelo final real expresado en conclusiones y recomendaciones profesionales.

De acuerdo con ello, el problema de investigación puede formularse del siguiente modo: bajo condiciones de escasez hídrica y régimen de prorrata, el Canal Buzeta presenta limitaciones para distribuir el recurso hídrico de manera oportuna y eficiente, debido a la baja capacidad de regulación del sistema, lo que reduce la disponibilidad efectiva del agua para sus usuarios. La respuesta que busca dar la tesina frente a este problema consiste en determinar si la incorporación conceptual de un modelo de acumulación lateral puede mejorar dicha disponibilidad hídrica efectiva en escenarios de baja disponibilidad. En términos más sintéticos, la investigación busca mejorar la disponibilidad hídrica de los usuarios del Canal Buzeta bajo condiciones de escasez, mediante una alternativa de regulación que permita optimizar la operación del sistema de riego. Desde el punto de vista teórico, esta respuesta se apoya en la idea de que la acumulación lateral puede actuar como un mecanismo de almacenamiento intermedio, capaz de desacoplar parcialmente la oferta instantánea de agua de la demanda puntual impuesta por los turnos de riego.

La regulación hídrica adquiere así un rol central dentro del modelo teórico. Esta puede entenderse como la capacidad del sistema para almacenar y redistribuir el recurso en el tiempo, ajustando la oferta a las condiciones de demanda. En sistemas con baja regulación, como ocurre en muchos canales tradicionales, el recurso debe ser entregado de acuerdo con el caudal instantáneo disponible, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a la escasez. Por el contrario, la incorporación de mecanismos de almacenamiento intermedio permite aumentar la flexibilidad operativa, reducir pérdidas asociadas a restricciones de entrega y

mejorar la oportunidad del riego. En este marco, la acumulación lateral se plantea como una solución teórica basada en el aprovechamiento de condiciones topográficas adyacentes al canal, como quebradas o depresiones naturales, para almacenar agua en determinados periodos y liberarla posteriormente de acuerdo con las necesidades del sistema. Su interés radica en que no se trata de una gran obra de regulación estacional, sino de una alternativa localizada, adaptable y potencialmente replicable, orientada a mejorar la disponibilidad efectiva del recurso bajo escenarios de restricción.

Las variables relevantes del sistema, coherentes con la imagen propuesta del modelo conceptual, pueden organizarse en distintos grupos. En primer lugar, se encuentran las variables de entrada, dentro de las cuales destacan la escasez hídrica estructural, el caudal disponible en el canal, la variabilidad temporal del recurso y las series de caudales históricas. En segundo lugar, aparecen las variables de operación, como el régimen de prorrata, los turnos de riego, la relación de distribución del recurso, la capacidad de conducción, las pérdidas del sistema y la eficiencia de conducción. En tercer lugar, se consideran variables territoriales y de soporte, tales como la topografía del entorno del canal, la existencia de quebradas laterales con potencial de almacenamiento, el uso de sistemas de información geográfica y modelos digitales de elevación, las imágenes satelitales, el trazado del canal y las áreas de riego por temporada. En cuarto lugar, destacan las variables de estado, asociadas a la capacidad de almacenamiento lateral, el nivel de regulación del sistema, las condiciones operativas del Canal Buzeta y la infraestructura disponible. Finalmente, se encuentran las variables de análisis y resultado, entre las que se incluyen la modelación hidrológica, la modelación hidráulica, la simulación de escenarios, la evaluación comparativa, los procesos de llenado y vaciado de quebradas, la disponibilidad efectiva del recurso hídrico, la localización de alternativas de acumulación lateral, el volumen de almacenamiento requerido, la mejora en la oportunidad de entrega y la mejora en la eficiencia operativa del sistema.

Todo este marco conceptual se articula directamente con los objetivos específicos de la investigación. Los primeros objetivos, orientados a identificar y analizar antecedentes técnicos y experiencias relacionadas con sistemas de acumulación y regulación de caudales en canales de riego, y a aplicar los conocimientos teóricos y metodológicos de las distintas asignaturas del magíster, constituyen la base de construcción del propio modelo teórico. Son estos objetivos los que permiten integrar el conocimiento previo y convertirlo en una estructura conceptual útil para la investigación. Posteriormente, el objetivo de caracterizar el sistema hidráulico y operativo del Canal Buzeta bajo condiciones de escasez hídrica y prorrata permite conectar la teoría con el sujeto de estudio, verificando en el caso real aquellas relaciones y restricciones que el modelo teórico plantea como centrales. A su vez, el objetivo orientado a establecer criterios técnicos, hidráulicos y operacionales para la evaluación de alternativas de acumulación lateral

corresponde al desarrollo lógico del modelo teórico, pues define las condiciones bajo las cuales la solución propuesta puede ser evaluada.

La articulación entre respuesta al problema y metodología se vuelve aún más clara en los objetivos siguientes. La generación de una base de datos del Canal Buzeta, integrando información topográfica, imágenes satelitales, trazado de canales, áreas de riego por temporada y variables operacionales asociadas al sistema de prorrata del río y turnos de riego, representa la traducción práctica del marco teórico en una base empírica de análisis. Del mismo modo, el establecimiento de herramientas de análisis y modelación para el procesamiento de información topográfica, imágenes satelitales y simulación hidráulica, así como la aplicación de dichas herramientas sobre la base de datos del Canal Buzeta, constituyen la fase en que el modelo teórico se transforma en un modelo aplicado. Esto coincide con la figura, en la cual el tránsito desde el modelo teórico al modelo real se produce mediante la elaboración de una propuesta metodológica, su aplicación y la generación de resultados.

En consecuencia, la respuesta al problema de investigación no queda solo en una formulación conceptual, sino que se articula a través de una secuencia metodológica coherente con los objetivos específicos. La revisión de antecedentes y la integración de conocimientos permiten construir el modelo teórico; la caracterización del Canal Buzeta permite comprender el sujeto de estudio; la definición de criterios teóricos y técnicos orienta la evaluación de alternativas; la construcción de una base de datos y la aplicación de herramientas de análisis y modelación permiten simular distintos escenarios de operación; y los resultados obtenidos hacen posible definir localizaciones y volúmenes de almacenamiento, establecer condiciones de operación de sistemas de acumulación lateral, formular conclusiones económicas, ambientales y sociales, y proponer recomendaciones para promover este tipo de soluciones como medidas de adaptación frente a la escasez hídrica.

De esta manera, el marco teórico responde plenamente a la lógica representada en la figura, porque explica cómo se construye el modelo conceptual de la investigación, cuál es el problema identificado, qué respuesta busca dar la tesina y cómo dicha respuesta se proyecta hacia la metodología y los objetivos específicos. En síntesis, el principal aporte teórico del estudio radica en integrar dimensiones que con frecuencia se analizan por separado, tales como la operación real de un canal de riego, la distribución del agua bajo prorrata y turnos, la regulación hídrica intermedia y la acumulación lateral como alternativa de gestión. Esta integración permite formular una mirada sistémica sobre la disponibilidad hídrica, no solo entendida como volumen de agua disponible, sino como la capacidad del sistema para entregarla de manera oportuna, eficiente y funcional a las necesidades de los usuarios.

A partir del diagnóstico del sistema y de la revisión de antecedentes técnicos, la investigación estructura progresivamente un modelo que vincula disponibilidad hídrica, conducción, prorrata, turnos de riego y regulación mediante acumuladores laterales. Esta construcción conceptual permite ordenar las variables consideradas y mostrar cómo la propuesta evoluciona desde la identificación del problema hacia una evaluación integrada de alternativas. La **Figura 3** sintetiza la evolución del modelo teórico utilizado como soporte de la investigación.

Figura 3 Evolución del modelo teórico de la investigación



Fuente: Elaboración propia

5 PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

La propuesta metodológica se estructura a partir de los objetivos específicos y adopta una ruta progresiva que integra cinco dimensiones de análisis: territorial y topográfica; hidráulica y operacional; técnico-constructiva; económica privada; y económico-social. La finalidad es avanzar desde la comprensión del Canal Buzeta y la identificación de sitios potenciales, hacia la estimación de obras, costos, beneficios y condiciones de implementación de acumuladores laterales de menor escala.

El estudio corresponde a una investigación aplicada con alcance de prefactibilidad. Por tanto, no pretende desarrollar diseños constructivos definitivos ni presupuestos para licitación, sino establecer una metodología trazable que permita comparar alternativas bajo supuestos homogéneos, reconocer las variables

críticas y determinar qué sitios justifican estudios posteriores de topografía, geotecnia, hidráulica, diseño eléctrico y evaluación agroeconómica.

El alcance se concentra en acumuladores laterales preferentemente emplazados fuera de cauce natural, con altura de muro inferior a 7 m y volumen inferior a 150.000 m³. Estas condiciones constituyen un filtro metodológico y normativo preliminar; no reemplazan la revisión particular de permisos, seguridad, propiedad, servidumbres, impactos ambientales ni exigencias de diseño aplicables a cada emplazamiento.

La unidad básica de análisis será cada sitio o tranque identificado. Posteriormente, las alternativas podrán evaluarse como un sistema coordinado de almacenamiento distribuido. Para mantener la comparabilidad, todos los costos se expresarán a una fecha base común y se registrará el origen de cada precio, distinguiendo valores del documento DT-18, análisis de precios unitarios, cotizaciones de mercado y supuestos de prefactibilidad.

La metodología se organiza en once etapas. Las siete primeras corresponden a la identificación, caracterización y evaluación técnica-operacional; las etapas 8 y 9 incorporan la estimación de inversión, operación, mantención y reposiciones; la etapa 10 desarrolla la evaluación económica y social; y la etapa 11 integra los resultados en una priorización multicriterio y en recomendaciones aplicadas.

5.1 ETAPA 1. ANTECEDENTES TÉCNICOS DEL ESTADO DEL ARTE

Esta etapa se orienta al cumplimiento de los objetivos específicos 1 y 2. Consiste en revisar, ordenar y sistematizar antecedentes técnicos, académicos y metodológicos relacionados con sistemas de acumulación, regulación de caudales, operación de canales, eficiencia de distribución, prorrata, turnos de riego, modelación hidráulica, planificación hídrica y almacenamiento en sistemas agrícolas.

Para ello, se utilizarán las 27 fichas de clases del Magíster en Water Management y 20 lecturas complementarias seleccionadas por su relación con el problema de estudio. Esta revisión permitirá construir una base conceptual y técnica para interpretar el funcionamiento del Canal Buzeta y justificar la evaluación de acumuladores laterales como alternativa de regulación intermedia. La trazabilidad de la revisión y la clasificación de los antecedentes utilizados se conserva en los Anexos 1 y 2.

Herramientas y fuentes: fichas bibliográficas, papers, documentos técnicos, material de clases, matriz bibliográfica, Word, Excel y gestor de referencias.

Producto esperado: sistematización del estado del arte y definición de los principales conceptos aplicables al modelo de acumulación lateral.

5.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DEL SUJETO DE ESTUDIO

Esta etapa se vincula con el objetivo específico 3 y tiene por finalidad caracterizar el sistema hidráulico, operativo y territorial del Canal Buzeta. Para ello, se recopilará y analizará información sobre el trazado del canal, longitud, bocatoma, sectores de riego, usuarios, áreas bajo riego, obras existentes, pérdidas de conducción, puntos críticos, turnos de riego y régimen de prorrata.

La caracterización permitirá comprender las restricciones actuales del sistema y reconocer oportunidades físicas para implementar soluciones de acumulación lateral. En esta etapa no se aplica todavía el filtro normativo de 7 metros y 150.000 m³ como criterio central, porque el propósito principal es conocer el sistema y sus condiciones reales de operación.

Herramientas y fuentes: QGIS, Civil 3D, HEC-RAS, Google Earth, Excel, imágenes satelitales, antecedentes de la organización de usuarios, información de prorrata y antecedentes técnicos del canal.

Producto esperado: diagnóstico hidráulico, operativo y territorial del Canal Buzeta bajo condiciones de escasez hídrica y prorrata.

5.3 ETAPA 3. DEFINICIÓN DEL MARCO TEÓRICO Y CRITERIOS NORMATIVOS

Esta etapa se relaciona con el objetivo específico 4 y transforma los antecedentes revisados en criterios verificables. Las alternativas se analizarán considerando su emplazamiento lateral, condición preferente fuera de cauce natural, altura estimada de muro, volumen útil, seguridad, cercanía al canal, factibilidad de llenado y vaciado, compatibilidad territorial y aporte a la operación bajo turnos.

Además de los criterios técnicos y normativos, se incorporarán criterios económicos y sociales desde el inicio del análisis. Esto evita seleccionar sitios únicamente por su capacidad geométrica, sin considerar el esfuerzo constructivo, la necesidad de impermeabilización, los costos de bombeo, la superficie realmente beneficiada o la capacidad de los usuarios para operar y mantener la infraestructura.

Los criterios principales serán: volumen útil; altura de muro; relación agua/movimiento de tierra; superficie de geomembrana; distancia y desnivel respecto del canal; potencia de bombeo; condición predial; riesgo ambiental; número de usuarios; superficie y cultivos apoyados; costo privado; costo social; costo por metro cúbico regulado; y aporte esperado a la oportunidad de riego.

Herramientas y fuentes: normativa vigente, Código de Aguas, criterios de seguridad, modelos digitales de elevación, revisión cartográfica, antecedentes del canal, metodología de evaluación social y manuales oficiales aplicables al año base.

Producto esperado: matriz integrada de criterios técnicos, hidráulicos, operacionales, normativos, económicos, sociales y ambientales.

5.4 ETAPA 4. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS INTEGRADA

Esta etapa se vincula con el objetivo específico 5. Su propósito es construir una base de datos integrada que permita ordenar la información territorial, topográfica, hidráulica y operacional necesaria para la evaluación de alternativas.

La base de datos incorporará el trazado del Canal Buzeta, perfiles disponibles, modelos digitales de elevación, imágenes satelitales, curvas de nivel, sectores con pérdidas, obras existentes, quebradas laterales, áreas de riego por temporada, antecedentes de prorrata, turnos de riego y puntos de interés para acumulación lateral.

Esta base permitirá pasar desde una identificación visual o territorial de sectores potenciales hacia un análisis más técnico, apoyado en información georreferenciada y procesable en herramientas SIG, modelación hidráulica y planillas de cálculo.

Herramientas y fuentes: QGIS, Civil 3D, HEC-RAS, Google Earth, Excel, DEM, imágenes satelitales y antecedentes operacionales.

Producto esperado: base de datos integrada del Canal Buzeta, organizada para el análisis de sectores potenciales de acumulación lateral.

5.5 ETAPA 5. PRESELECCIÓN MEDIANTE FILTRO TÉCNICO-NORMATIVO

Esta etapa se asocia al objetivo específico 6. Consiste en aplicar un filtro preliminar a los sectores identificados, con el propósito de seleccionar alternativas que sean compatibles con el alcance técnico y normativo de la tesina.

El filtro considerará como condiciones principales que las alternativas correspondan a obras de menor escala, con altura estimada de muro inferior a 7 metros y volumen potencial de almacenamiento inferior a 150.000 m³. Además, se priorizarán emplazamientos fuera de cauce natural, ubicados lateralmente respecto del canal y con posibilidad razonable de conexión hidráulica.

También se revisará la relación entre el sitio y el canal existente, considerando si el llenado puede realizarse por gravedad o requiere asistencia mecánica, si el vaciado puede retornar al canal o entregar agua a un sector de riego, y si la diferencia de cotas permite una operación funcional. Este punto es importante, porque en algunos sectores la baja pendiente del canal o la cota del fondo del acumulador podrían generar la necesidad de elevación mecánica para extraer o reincorporar el volumen almacenado.

Herramientas y fuentes: Google Earth, QGIS, Civil 3D, perfiles topográficos, cotas del canal, modelos de superficie, normativa y planillas Excel.

Producto esperado: listado preliminar de alternativas clasificadas según cumplimiento técnico, hidráulico y normativo.

5.6 ETAPA 6. DEFINICIÓN DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y MODELACIÓN

Esta etapa se relaciona con el objetivo específico 7 y define el flujo de procesamiento de la información. Google Earth se utilizará para identificación territorial; QGIS para organización y análisis geoespacial; Civil 3D para superficies, perfiles, geometría, cubicaciones y áreas de impermeabilización; HEC-RAS como referencia del comportamiento hidráulico y de las cotas del canal; y Excel para cálculos, presupuestos, evaluación económica, análisis social y comparación de escenarios.

La topografía proveniente de InfraWorks se utilizará como apoyo de contexto y no como única base para diseño o presupuesto definitivo. Para cada alternativa se deberá registrar el nivel de precisión de la superficie utilizada y establecer si se requiere topografía de detalle antes de continuar a una etapa de diseño.

Herramientas principales: Google Earth, QGIS, Civil 3D, HEC-RAS, Excel, DEM e imágenes satelitales.

Producto esperado: flujo de trabajo técnico para procesar información topográfica, espacial e hidráulica de los sitios potenciales.

5.7 ETAPA 7. DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPERACIONALES

Esta etapa se relaciona con los objetivos específicos 8, 9 y 10. El análisis considerará una situación base sin acumulación y distintos escenarios con acumulación lateral. Se evaluará la captación desde el canal, el almacenamiento temporal, la restitución al canal o la entrega directa a sectores de riego y la necesidad de impulsión.

Los caudales utilizados deberán ser representativos de la operación real y ajustarse a la prorrata vigente. La disponibilidad para llenar un tranque no se asimilará automáticamente al caudal pasante total: se definirá una fracción operacionalmente derivable, compatible con los derechos, turnos y entregas aguas abajo. Se analizarán ventanas de llenado, operación secuencial, llenado parcial, uso de una reserva distribuida y distintas tasas de entrega. Los resultados se expresarán en volumen regulado por ciclo, ciclos factibles por temporada, caudal de llenado, tiempo de llenado, caudal de entrega, superficie equivalente apoyada y modificación esperada del turno.

A partir de las condiciones de operación descritas, la **Tabla 3** resume los escenarios metodológicos propuestos para comparar la situación actual con las alternativas de acumulación lateral.

Tabla 3 Escenarios metodológicos propuestos

Escenario	Descripción	Propósito
Escenario base	Operación actual del canal sin acumulación lateral	Representar la condición actual bajo prorrata y turnos
Escenario con acumulación lateral	Incorporación de uno o más acumuladores laterales	Evaluar aporte a la regulación y oportunidad de entrega
Escenario de llenado	Derivación de agua desde el canal hacia el acumulador	Verificar factibilidad hidráulica de carga
Escenario de vaciado	Entrega desde el acumulador hacia el canal o sector de riego	Verificar factibilidad de uso operacional
Escenario condicionado	Operación con necesidad de elevación mecánica	Evaluar restricciones por diferencia de cotas

Fuente: Elaboración propia

Producto esperado: definición de escenarios de análisis para comparar la operación actual y la operación con acumulación lateral.

5.8 ETAPA 8. ESTIMACIÓN DE COSTOS PRIVADOS DE INVERSIÓN

Esta etapa incorpora expresamente la estimación de costos de las alternativas. El presupuesto privado se desarrollará por partidas y no mediante un valor global por metro cúbico. La cantidad de cada partida provendrá de las cubicaciones y geometrías de Civil 3D, mientras que los precios unitarios se obtendrán del DT-18 actualizado, de análisis de precios unitarios trazables y de cotizaciones formales cuando la partida no esté contenida en dicho documento. El extracto del DT-18 utilizado para respaldar los precios unitarios de las partidas compatibles se presenta en el Anexo 4

Para el movimiento de tierras se considerarán, según corresponda, excavación con máquina, escarpe, selección y acopio de material, colocación y distribución para terraplenes, compactación por capas, transporte a botadero, manejo de excedentes y material de empréstito. El volumen excavado no se considerará automáticamente utilizable como relleno; su aprovechamiento se condicionará a la aptitud geotécnica y a las pérdidas de selección.

La impermeabilización se estimará a partir de la superficie tridimensional del fondo y los taludes del vaso. Se incorporarán traslapes, anclajes, mermas, geotextil de protección, preparación de la subrasante, soldaduras, control de calidad e instalación. Debido a que la geomembrana y su colocación pueden no estar representadas adecuadamente en el DT-18, su precio deberá respaldarse mediante

cotizaciones comparables que especifiquen material, espesor, densidad, resistencia, garantía, transporte e instalación.

El presupuesto incluirá además obras de entrada y salida, tuberías, válvulas, cámaras, desagües, rebalses, cercos y elementos de seguridad, caminos de acceso, instrumentación básica, estudios, permisos, inspección, gastos generales, utilidades, contingencias e impuestos, distinguiendo cuáles corresponden a costos reales y cuáles son transferencias para la evaluación social.

$$C_{MT} = \sum_{i=1}^n (Q_i \times PU_i) \quad (5.8.1)$$

$$A_{imp} = A_f + A_t + A_{tr} + A_a + A_m \quad (5.8.2)$$

$$C_{imp} = A_{imp} \times PU_{imp} \quad (5.8.3)$$

$$I_{priv} = C_{dir} + C_{ind} + C_{cont} + Imp \quad (5.8.4)$$

Donde: CMT es el costo de movimiento de tierras; Q_i es la cantidad de la partida i ; PU_i es su precio unitario; A_{imp} es el área total de impermeabilización; A_f , A_t , A_{tr} , A_a y A_m corresponden, respectivamente, a las áreas de fondo, taludes, traslapes, anclajes y merma; C_{imp} es el costo de impermeabilización; PU_{imp} es el precio unitario de suministro e instalación; I_{priv} es la inversión privada total; y C_{dir} , C_{ind} , C_{cont} e Imp representan los costos directos, indirectos, contingencias e impuestos aplicables.

La **Tabla 4** organiza las principales partidas del presupuesto privado, sus unidades de cuantificación y las fuentes de precio aplicables

Tabla 4 Estructura metodológica del presupuesto privado

Componente	Cantidad principal	Fuente de precio	Observación metodológica
Excavación y escarpe	m ³	DT-18 / APU	Aplicar precio según tipo de terreno y rendimiento
Relleno y terraplén	m ³	DT-18 / APU	Separar selección, colocación y compactación
Transporte y botadero	m ³ ·km / m ³	DT-18 / cotización	Depende de distancia y balance de masas

Componente	Cantidad principal	Fuente de precio	Observación metodológica
Geomembrana y geotextil	m ²	Cotizaciones de mercado	Definir especificación, traslapes, anclajes e instalación
Obras hidráulicas	m, unidad, m ³	DT-18 / APU / cotización	Entrada, salida, tuberías, cámaras, válvulas y seguridad
Sistema de bombeo y control	unidad / kW	Cotizaciones	Bomba, motor, variador, tableros, válvulas y telemetría
Sistema fotovoltaico	kWp / unidad	Cotizaciones	Paneles, estructura, inversor, protecciones, cableado y montaje
Estudios y administración	% o suma alzada	Criterio de prefactibilidad	Topografía, geotecnia, diseño, permisos e inspección
Contingencias	%	Análisis de riesgo	Aplicar sobre componentes con incertidumbre identificada

Fuente: elaboración propia. Los valores monetarios serán calculados en la etapa específica de costos.

La comparación utilizará, como mínimo, un escenario de precios bajo, uno de referencia y uno alto. El DT-18 servirá como referencia para partidas disponibles; las partidas especiales deberán actualizarse a una misma fecha base. El resultado no se limitará al costo total: se calcularán costo por metro cúbico de capacidad, costo por metro cúbico regulado anual y participación de cada componente en la inversión.

Producto esperado: presupuesto privado preliminar por alternativa, con cantidades, precios unitarios, fuente, fecha, rango de incertidumbre y costo unitario de almacenamiento.

5.9 ETAPA 9. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN, MANTENCIÓN Y SISTEMA FOTOVOLTAICO

Esta etapa cuantificará los costos necesarios para que la alternativa funcione durante su vida útil. Se distinguirán operación rutinaria, mantención preventiva, mantención correctiva y reposiciones. Entre las actividades se considerarán limpieza del vaso y conducciones, inspección de geomembrana, reparación de soldaduras, manejo de sedimentos, mantención de válvulas, bombas, tableros, sensores, cercos y caminos.

Cuando la entrega requiera impulsión, la potencia de bombeo se estimará a partir del caudal de diseño y de la altura manométrica total, incluyendo desnivel geométrico, pérdidas por fricción y singularidades. La potencia eléctrica deberá incorporar las eficiencias de bomba, motor y variador. El sistema fotovoltaico se dimensionará con base en la energía diaria requerida, las horas solares equivalentes del emplazamiento, la eficiencia global del sistema y un margen de diseño. El costo de inversión del sistema fotovoltaico incluirá módulos, estructura, inversor o variador, protecciones, cableado, tableros, puesta a tierra, control, montaje, pruebas y obras civiles. El análisis de ciclo de vida incorporará limpieza, inspecciones y reposiciones de componentes cuya vida útil sea menor que el horizonte del proyecto. También se evaluará la alternativa de conexión a red o sistema híbrido cuando resulte técnicamente pertinente.

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{MT} \quad (5.9.1)$$

$$P_e = \frac{P_h}{\eta_{bomba} \times \eta_{motor} \times \eta_{control}} \quad (5.9.2)$$

$$P_{FPV} = \frac{E_d}{HSE \times \eta_{sistema}} \quad (5.9.3)$$

$$C_{O\&M,anual} = C_{op} + C_{mp} + C_{mc} + C_{ra} \quad (5.9.4)$$

Donde: P_h es la potencia hidráulica; ρ es la densidad del agua; g es la aceleración de gravedad; Q es el caudal de diseño; HMT es la altura manométrica total; P_e es la potencia eléctrica requerida; η_{bomba} , η_{motor} y $\eta_{control}$ son las eficiencias de la bomba, el motor y el sistema de control, respectivamente; P_{FPV} es la potencia fotovoltaica preliminar; E_d es la energía diaria requerida; HSE corresponde a las horas solares equivalentes; $\eta_{sistema}$ es la eficiencia global del sistema fotovoltaico; C_{op} es el costo de operación rutinaria; C_{mp} es el costo de mantención preventiva; C_{mc} es el costo de mantención correctiva; y C_{ra} es el costo de reposición anualizada.

Con el propósito de incorporar los desembolsos necesarios durante la vida útil de cada alternativa, la siguiente **Tabla 5** identifica los componentes considerados en el costo de ciclo de vida.

Tabla 5 Componentes del costo de ciclo de vida

Categoría	Componentes principales	Tratamiento en la evaluación
Operación	Maniobras, vigilancia, limpieza, control y gestión de turnos	Costo anual según frecuencia y dotación
Mantenición civil	Geomembrana, taludes, conducciones, cámaras y cercos	Programa preventivo y reparaciones esperadas
Mantenición electromecánica	Bombas, motores, válvulas, tableros y sensores	Costo anual y mantenimiento por horas de operación
Sistema fotovoltaico	Limpieza de paneles, inspección eléctrica y protecciones	Costo anual según tamaño y ambiente
Reposiciones	Bomba, motor, inversor, baterías si existieran y equipos de control	Registrar año de reposición y valor residual
Energía complementaria	Red eléctrica, generador o sistema híbrido	Costo variable por kWh o combustible

Fuente: Elaboración propia

Producto esperado: costo anual de operación y mantención, calendario de reposiciones, costo presente del ciclo de vida y dimensionamiento preliminar del sistema de impulsión y generación fotovoltaica.

5.10 ETAPA 10. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL

Esta etapa se vincula principalmente con el objetivo específico 11. La evaluación se realizará con enfoque incremental, comparando la situación sin proyecto con la situación con proyecto. La situación sin proyecto mantendrá las restricciones actuales de prorrata, turnos, pérdidas y oportunidad de entrega. La situación con proyecto incorporará únicamente los cambios atribuibles al acumulador lateral, evitando imputar beneficios que no puedan demostrarse.

Los beneficios se estimarán sobre el volumen efectivamente regulado y utilizado, no sobre la capacidad geométrica total. Para cada alternativa se determinarán los ciclos factibles de llenado, el volumen entregado, la superficie y usuarios apoyados y la respuesta productiva esperada. Los beneficios podrán expresarse como margen agrícola incremental, pérdidas productivas evitadas,

continuidad de cultivos, recuperación de superficie o reducción de costos, cuidando no duplicar beneficios.

El presupuesto privado se convertirá a precios sociales mediante desagregación por mano de obra, equipos, materiales nacionales, componentes importados, energía, impuestos y transferencias. Se utilizarán la tasa social de descuento, factores de corrección de mano de obra, factor social de la divisa y demás precios sociales oficiales vigentes para el año base de la evaluación. No se aplicará un factor único al costo total, porque cada componente posee un tratamiento distinto.

La evaluación incluirá un horizonte coherente con la vida útil de las obras y los equipos, reposiciones, costos de operación y mantención, valor residual e impuestos o transferencias que deban excluirse. Además de los indicadores de rentabilidad, se reportarán indicadores de costo-efectividad, especialmente cuando la información productiva no permita estimar beneficios con suficiente precisión.

$$C_{SI} = \sum_{i=1}^n (C_{P,i} \times FS_i) - I_T \quad (5.10.1)$$

$$V_{RA} = \min [V_u \times N_c ; V_{DU}] \quad (5.10.2)$$

$$B_{AI} = \sum_{i=1}^n [A_i \times (M_{CP,i} - M_{SP,i})] \quad (5.10.3)$$

$$VAN_s = -I_s + \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1 + r_s)^t} + VR_a \quad (5.10.4)$$

$$B/C = \frac{VP(B_s)}{VP(C_s)} \quad (5.10.5)$$

Donde: C SI representa el costo social de inversión; C P,i corresponde al costo privado desagregado del componente i; FS i es el factor social aplicable; e IT corresponde a los impuestos y transferencias que deben excluirse. V RA es el volumen regulado anual; V u es el volumen útil; N c es el número de ciclos factibles de llenado; y V DU es el volumen realmente derivable y utilizable.

B AI representa el beneficio agrícola incremental; A i es la superficie apoyada; M CP,i y M SP,i son los márgenes agrícolas con y sin proyecto. VAN s es el valor actual neto social; I s es la inversión social inicial; B t y C t son los beneficios y costos sociales del período t; r s es la tasa social de descuento; n es el horizonte de evaluación; VR a es el valor residual actualizado; VP es el valor presente; y B/C es la relación beneficio-costos.

Para transparentar la base de cálculo de la evaluación, la siguiente **Tabla 6** resume las variables, fuentes y métodos considerados en la evaluación económica y social.

Tabla 6 Variables de la evaluación económica y social

Grupo	Variables principales	Fuente o método
Inversión privada	Movimiento de tierra, impermeabilización, obras hidráulicas, bombeo, FV y costos indirectos	Cubicaciones, DT-18, APU y cotizaciones
Costos de ciclo de vida	Operación, mantención, energía y reposiciones	Programa de operación y vida útil de componentes
Conversión social	Mano de obra, divisa, impuestos, transferencias y otros factores	Precios sociales oficiales vigentes para el año base
Beneficios hídricos	Volumen regulado, continuidad y oportunidad de entrega	Escenarios de prorrata y turnos
Beneficios agrícolas	Superficie, cultivos, rendimientos, precios y márgenes incrementales	Patrón productivo y evaluación agroeconómica
Indicadores	VAN, TIR, B/C, costo por m ³ regulado y costo por hectárea apoyada	Flujo incremental y análisis de sensibilidad

Fuente: elaboración propia.

Se desarrollarán sensibilidades sobre volumen útil, ciclos de llenado, prorrata, costo de geomembrana, costo del sistema fotovoltaico, vida útil, reposiciones, superficie beneficiada, margen agrícola y tasa de descuento. También se evaluarán escenarios combinados pesimista, base y optimista.

Cuando no exista información suficiente para calcular beneficios agrícolas, la alternativa se evaluará provisoriamente mediante costo-efectividad y análisis multicriterio. En ese caso se dejará explícito que no es posible concluir rentabilidad social definitiva hasta completar usuarios, superficie, cultivos, demandas y márgenes.

Producto esperado: flujo privado y social por alternativa, indicadores de rentabilidad o costo-efectividad, análisis de sensibilidad y determinación de las variables que controlan la conveniencia del proyecto.

5.11 ETAPA 11. INTEGRACIÓN, PRIORIZACIÓN Y RECOMENDACIONES APLICADAS

Esta etapa integra los objetivos específicos 9, 10, 11 y 12. Las alternativas serán comparadas mediante una matriz multicriterio que mantendrá separados los resultados técnicos, económicos, sociales, ambientales y de implementación. La ponderación se utilizará como apoyo a la decisión y no para ocultar restricciones críticas: una alternativa podrá quedar condicionada, aunque obtenga un puntaje global alto si presenta inviabilidad normativa, predial, geotécnica o hidráulica.

La priorización distinguirá entre alternativas recomendadas para topografía de detalle, alternativas que requieren reformulación, alternativas condicionadas a nueva información y alternativas descartadas. Las recomendaciones indicarán los antecedentes faltantes, la secuencia de estudios y las condiciones mínimas para una futura formulación ante la organización de usuarios o instrumentos de fomento.

Con el objeto de comparar las alternativas de manera integral, la **Tabla 7** presenta los indicadores técnicos, económicos, sociales y de implementación utilizados en la priorización.

Tabla 7 Indicadores de comparación integrada

Dimensión	Indicadores principales
Técnica y geométrica	Altura de muro, volumen útil, movimiento de tierra, relación agua/tierra y superficie de geomembrana
Hidráulica y operacional	Caudal de llenado, ciclos factibles, desnivel, HMT, potencia, caudal de entrega y aporte a turnos
Económica privada	Inversión total, costo de ciclo de vida, costo por m ³ de capacidad y costo por m ³ regulado anual
Social y productiva	Usuarios, hectáreas, cultivos, margen incremental, VAN social, TIR social y relación B/C
Ambiental y territorial	Condición fuera de cauce, afectación predial, riesgos, accesibilidad e interferencias
Implementación	Calidad de información, permisos, capacidad de operación, mantención y posibilidad de ejecución por etapas

Fuente: elaboración propia.

La **Tabla 8** sintetiza la propuesta metodológica ajustada, vinculando cada etapa de trabajo con los objetivos, métodos y productos esperados.

Tabla 8 Matriz resumen de la propuesta metodológica ajustada

Etapas	Objetivos asociados	Método principal	Producto esperado
1. Estado del arte	1–2	Revisión y sistematización	Base conceptual y técnica
2. Caracterización	3	Diagnóstico del Canal Buzeta	Situación base sin proyecto
3. Criterios	4	Definición de criterios integrados	Matriz de evaluación
4. Base de datos	5	Integración espacial, hidráulica y económica	Base maestra por alternativa
5. Filtro técnico-normativo	6	Preselección de sitios	Alternativas priorizadas o condicionadas
6. Herramientas	7	Flujo SIG, Civil 3D, HEC-RAS y Excel	Procedimiento reproducible
7. Escenarios operacionales	8–10	Simulación sin y con acumulación	Volúmenes, caudales, ciclos y turnos
8. Inversión privada	11	Cubicaciones, DT-18, APU y cotizaciones	Presupuesto privado preliminar
9. O&M y fotovoltaico	11	Ciclo de vida y dimensionamiento energético	OPEX, reposiciones y CAPEX FV
10. Evaluación social	11	Flujo incremental y precios sociales	VAN, TIR, B/C o costo-efectividad
11. Priorización	9–12	Matriz multicriterio y análisis de riesgo	Conclusiones y recomendaciones

Fuente: elaboración propia.

Para ordenar la ejecución de las actividades descritas, la siguiente **Tabla 9** presenta la programación metodológica referencial y sus principales hitos de término.

Tabla 9 Programación metodológica ajustada

Etapas	Semanas referenciales	Hito de término
1. Estado del arte	1–5	Marco conceptual y antecedentes sistematizados
2. Caracterización del canal	4–8	Diagnóstico y situación sin proyecto
3. Criterios de evaluación	6–9	Matriz técnico-normativa y económica
4. Base de datos	8–12	Base integrada validada
5. Filtro de sitios	11–13	Listado de alternativas
6. Herramientas y modelación	12–15	Flujo de análisis aplicado
7. Escenarios operacionales	15–18	Simulación y resultados hidráulicos
8. Costos de inversión	18–20	Presupuesto privado preliminar
9. O&M y sistema FV	19–21	Costo de ciclo de vida
10. Evaluación económica-social	20–23	Indicadores y sensibilidades
11. Priorización y recomendaciones	22–24	Conclusiones y propuesta aplicada

Fuente: elaboración propia.

En síntesis, la propuesta metodológica ajustada permite pasar desde la identificación de sitios hasta una evaluación integrada de prefactibilidad. La incorporación explícita de los costos de excavación, relleno, impermeabilización, obras hidráulicas, bombeo, sistema fotovoltaico, operación y mantención evita concluir conveniencia sobre la sola base del volumen disponible.

La evaluación económica y social se desarrollará una vez completadas las cantidades y precios de cada partida. El DT-18 constituirá una referencia para las partidas compatibles, mientras que la geomembrana, los equipos electromecánicos y el sistema fotovoltaico deberán respaldarse mediante especificaciones y cotizaciones comparables. Los precios privados serán desagregados y transformados mediante los precios sociales oficiales correspondientes al año base.

La aplicación de esta metodología permitirá determinar si los acumuladores laterales pueden constituir una alternativa técnica, operacional, económica y socialmente conveniente para mejorar la disponibilidad efectiva y la oportunidad de distribución del agua entre los usuarios del Canal Buzeta.

6 APLICACIÓN METODOLÓGICA

La aplicación metodológica corresponde a la ejecución de la ruta definida en el capítulo anterior, pasando desde la formulación de criterios técnicos, hidráulicos, territoriales y normativos hacia la evaluación preliminar de sitios potenciales de acumulación lateral en el Canal Buzeta. Este capítulo tiene por finalidad explicar el procedimiento aplicado, las herramientas utilizadas, los criterios de selección y las condiciones operacionales consideradas para evaluar la factibilidad inicial de acumuladores laterales de menor escala.

De acuerdo con el alcance definido para la tesina, el análisis se orienta a evaluar alternativas de acumulación lateral preferentemente emplazadas fuera de cauce natural, con altura de muro inferior a 7 m y volumen de almacenamiento inferior a 150.000 m³. Esta delimitación permite mantener el estudio dentro de una escala compatible con la infraestructura de riego existente, evitando que el análisis derive hacia embalses mayores o infraestructuras de regulación de alta complejidad.

En este contexto, el Capítulo 6 no busca presentar el diseño definitivo de las obras ni establecer las conclusiones finales, sino describir la forma en que se aplicaron los criterios metodológicos para identificar sitios, estimar volúmenes preliminares, relacionar cada alternativa con el Canal Buzeta, evaluar su conexión hidráulica y definir escenarios operacionales de llenado y vaciado. Los resultados numéricos obtenidos mediante esta aplicación se indican posteriormente en el Capítulo 7.

6.1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA APLICACIÓN

La secuencia de aplicación fue reorganizada para que cada resultado económico pueda rastrearse hasta su dato hidráulico y geométrico de origen. La numeración válida corresponde a los Tranques 1 a 15 de la matriz técnica vinculada con HEC-RAS; los polígonos KMZ se emplearon únicamente para recuperar ubicación y coordenadas. Los volúmenes, cotas y necesidades de elevación se obtuvieron desde las cubicaciones y planillas técnicas consolidadas.

Con el fin de mantener la trazabilidad entre antecedentes, cálculos y resultados, la siguiente **Tabla 10** resume la secuencia efectiva de aplicación de la metodología.

Tabla 10 Secuencia efectiva de la aplicación metodológica

Etapas	Aplicación realizada	Producto obtenido
1. Base territorial	Control de numeración, coordenadas UTM, PK y relación con el eje del canal.	Matriz única de 15 tranques.
2. Sectorización hidráulica	Asignación de tramo HEC-RAS, sector y caudal pasante normal.	Caudal de referencia por alternativa.

Etapas	Aplicación realizada	Producto obtenido
3. Cubicación	Cálculo en Civil 3D de volumen útil, excavación, relleno y superficies.	Cantidades físicas por tranque.
4. Operación	Cálculo de caudal de diseño con 8 h/día y máximo 20 días.	Caudal de operación y tiempo de ciclo.
5. Conducciones	Selección preliminar de DN y cálculo de pérdidas.	Diámetro, velocidad y HMT.
6. Elevación	Cálculo de potencia hidráulica, eléctrica y motor.	Equipo de bombeo por tranque.
7. Recurso solar	Asignación de tres sectores y simulación horaria DHC/DPHM.	Generación específica por sector.
8. Sistema FV	Dimensionamiento iterativo del campo fotovoltaico sin baterías.	Potencia instalada en kWp.
9. Costos	CAPEX civil, impermeabilización, tuberías, bombeo, FV y OPEX.	Costo por tranque y por temporada.
10. Evaluación social	Desagregación de costos y aplicación de factores sociales.	Flujo social y análisis de sensibilidad.

Fuente: elaboración propia.

El modelo integrado que vincula la base territorial, los antecedentes HEC-RAS, las cubitaciones, el dimensionamiento fotovoltaico y la evaluación económica se presenta en el Anexo 5.

6.2 CONSOLIDACIÓN DE LA BASE TÉCNICA DE LOS 15 TRANQUES

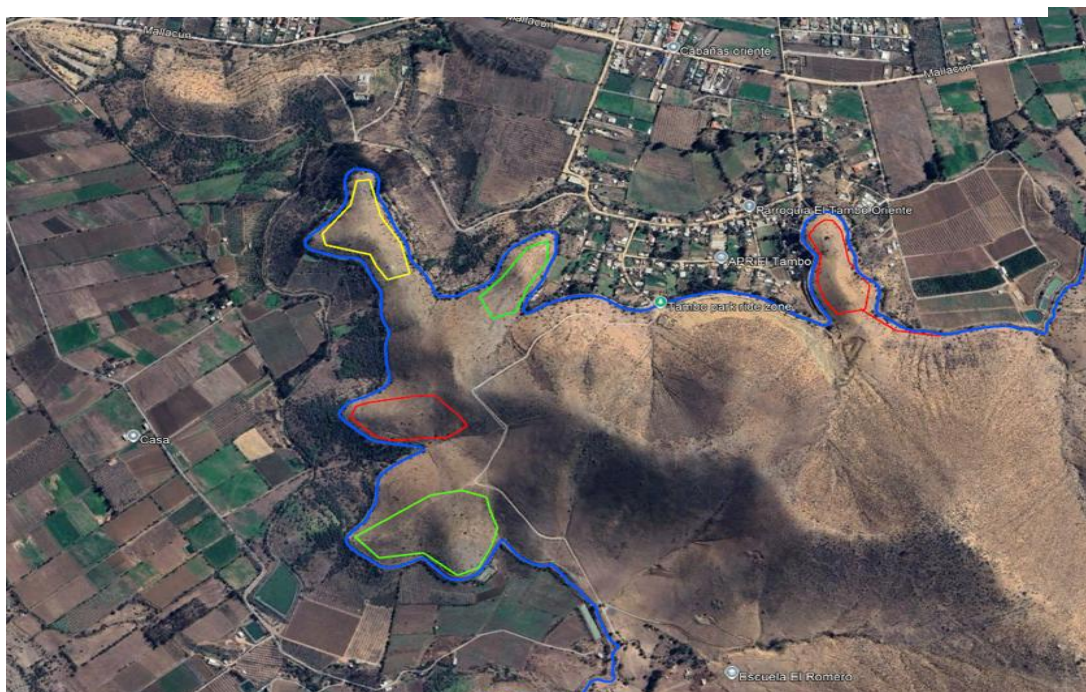
La base técnica se construyó integrando la matriz de coordenadas, los resultados de Civil 3D, las estaciones del modelo HEC-RAS y la matriz de dimensionamiento fotovoltaico. Para cada tranque se mantuvieron como campos obligatorios el identificador, las coordenadas Este y Norte, el PK o estación representativa, el sector operacional, el caudal pasante, el volumen útil, las longitudes de entrada y salida, las cotas hidráulicas y la condición de elevación mecánica.

La matriz consolidada, sus campos de entrada, fórmulas y vínculos entre hojas pueden revisarse en el Anexo 5.

La preselección territorial de alternativas se realizó buscando sectores próximos al Canal Buzeta que presentaran condiciones topográficas compatibles con la acumulación lateral y una conexión potencial con la infraestructura existente. El análisis considera que los sitios deben evaluarse posteriormente en términos de volumen, altura de muro, condición fuera de cauce, factibilidad de llenado y

restitución, requerimientos de impulsión y restricciones territoriales. Como ejemplo del procedimiento aplicado, la **Figura 4** muestra la identificación preliminar de sitios de acumulación lateral y su relación con el trazado del canal en el sector El Tambo.

Figura 4 Identificación preliminar de sitios de acumulación y trazado del Canal Buzeta sector El Tambo.



Fuente: elaboración propia sobre imagen satelital y trazado georreferenciado del canal

La imagen permitió contrastar la posición relativa de los polígonos candidatos respecto del eje del canal, los caminos existentes, las áreas agrícolas y los sectores poblados. Esta revisión se utilizó únicamente como filtro territorial y de conectividad preliminar; la delimitación definitiva del vaso, del muro y de las conducciones se efectuó posteriormente con información topográfica y superficies de Civil 3D.

La **Tabla 11** presenta los campos que componen la matriz consolidada y su función como respaldo de trazabilidad para el análisis.

Tabla 11 Campos y fuente de trazabilidad de la matriz consolidada

Campo	Uso en el análisis	Fuente principal
Tranque 1–15	Identificación oficial y vínculo entre planillas.	Matriz HEC-RAS consolidada.
Este y Norte UTM	Ubicación territorial y control espacial.	KMZ y revisión cartográfica.
PK / estación HEC-RAS	Asignación de tramo hidráulico.	Modelo HEC-RAS.

Campo	Uso en el análisis	Fuente principal
Sector y caudal pasante	Límite hidráulico normal del tramo.	Flow Change Locations del modelo.
Volumen útil	Volumen que debe llenarse o entregarse.	Cubicación técnica.
Excavación y relleno	Base de costos de movimiento de tierra.	Civil 3D.
Área impermeable	Base para geomembrana y geotextil.	Superficie 3D del vaso.
Longitud y cota de conducciones	Cálculo de pérdidas y HMT.	HEC-RAS, Civil 3D y trazado preliminar.
Sector solar	Asignación de serie horaria representativa.	DHC, DPHM y Explorador Solar.

Fuente: elaboración propia.

6.3 SECTORIZACIÓN HIDRÁULICA Y SOLAR

La sectorización hidráulica se obtuvo a partir de los cambios de caudal incorporados en HEC-RAS. El caudal definido en cada Flow Change Location se mantuvo hasta la estación siguiente, permitiendo asignar a cada tranque un caudal pasante normal compatible con su ubicación. Esta condición se utilizó como referencia hidráulica, pero no como caudal íntegro disponible para el bombeo.

Para relacionar la ubicación de cada alternativa con la disponibilidad de agua, la siguiente **Tabla 12** presenta los sectores hidráulicos de referencia del Canal Buzeta.

Tabla 12 Sectores hidráulicos de referencia del Canal Buzeta

Tramo	Rango aproximado de PK	Sector	Caudal pasante normal
1	PK 0+000 a PK 12+700	El Tambo	3,000 m ³ /s
2	PK 12+701 a PK 20+000	Colliguay	2,865 m ³ /s
3	PK 20+001 a PK 30+100	Tahuinco	2,612 m ³ /s
4	PK 30+101 a PK 77+000	Limáhuida / Los Loros / Socavón	2,164 m ³ /s
5	PK 77+001 a PK 92+400	Cañas I y II	1,341 m ³ /s

Fuente: elaboración propia a partir del modelo HEC-RAS del Canal Buzeta.

Para representar la variación espacial del recurso solar se agruparon los quince tranques en tres sectores. Cada grupo fue asociado al punto meteorológico

y fotovoltaico más próximo, utilizando archivos horarios DHC_PVSYST_E, planillas DPHM_E y reportes del Explorador Solar. Esta agrupación evitó aplicar un único rendimiento fotovoltaico a los más de 90 km del canal.

Los informes PDF, registros horarios y planillas meteorológicas y fotovoltaicas utilizados para representar los tres sectores se presentan en el Anexo 6.

6.4 CUBICACIÓN Y CANTIDADES FÍSICAS DE LAS OBRAS

Las cantidades físicas se obtuvieron mediante superficies de terreno y proyecto en Civil 3D. Para cada sitio se definieron el vaso, el nivel máximo de agua, los taludes, el coronamiento y la superficie del muro. El volumen útil se calculó entre la superficie de agua y la superficie proyectada; la excavación y el relleno se determinaron mediante superficies de comparación. La superficie de impermeabilización se obtuvo desde el desarrollo tridimensional del fondo y taludes mojados, incorporando posteriormente traslapes, anclajes y mermas.

La **Tabla 13** resume los productos de cubicación que alimentan las estimaciones de costos y la evaluación posterior de las alternativas.

Tabla 13 Productos de la cubicación utilizados en costos

Producto	Unidad	Aplicación posterior
Volumen útil de agua	m ³	Caudal de operación, ciclos y costo por m ³ .
Excavación	m ³	Costo de excavación con maquinaria.
Relleno estructural	m ³	Selección, colocación y compactación.
Excedente o déficit de material	m ³	Botadero o empréstito, sujeto a geotecnia.
Superficie 3D mojada	m ²	Geomembrana y geotextil.
Longitud de coronamiento y anclaje	m	Zanjas, retornos y terminaciones.
Longitud de conducción	m	Tuberías de entrada y salida.

Fuente: elaboración propia.

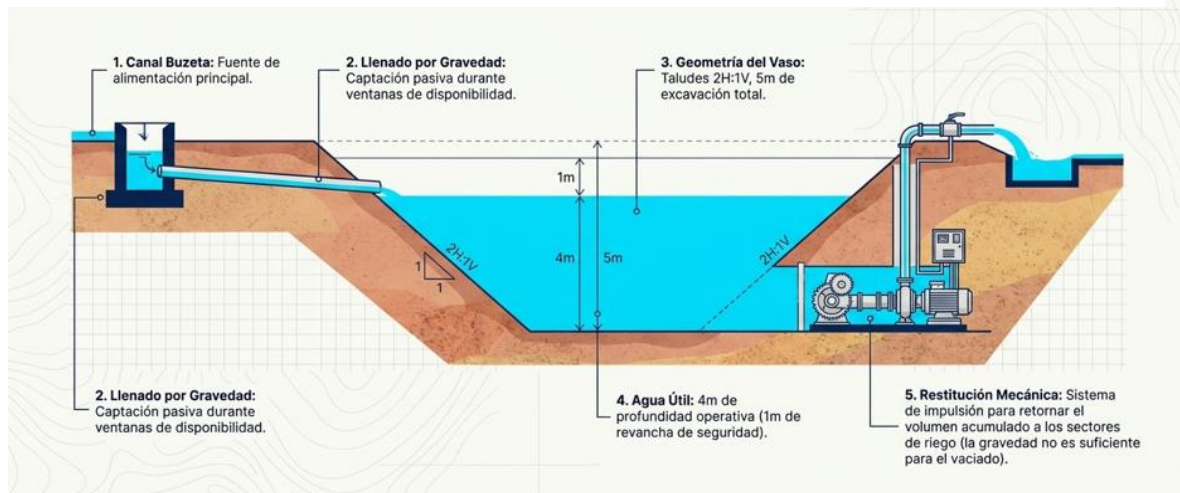
$$\eta_{\text{física},i} = \frac{V_{\text{útil},i}}{(V_{\text{exc},i} + V_{\text{rel},i})} \quad (6.4.1)$$

6.5 CAUDAL DE OPERACIÓN ADOPTADO

La principal corrección respecto de la aplicación anterior fue abandonar el uso directo del 100% del caudal pasante y las ventanas fijas de 36 o 40 horas como criterio único de dimensionamiento. La bomba se dimensionó con un caudal de

operación calculado para cada tranque, considerando ocho horas solares de trabajo por día y un plazo máximo de veinte días efectivos para completar un ciclo de llenado o vaciado.

Figura 5 Ejemplo de modelación preliminar del vaso y muro de tranque en Civil 3D



Fuente: elaboración propia; esquema conceptual de operación del tranque lateral.

El esquema sintetiza la configuración operacional evaluada: captación lateral desde el Canal Buzeta, llenado preferentemente gravitacional, vaso con taludes referenciales 2H:1V, una profundidad útil del orden de 4 m y una revancha de seguridad de 1 m. Cuando la diferencia de cotas no permite aprovechar gravitacionalmente la totalidad del volumen, se incorpora una restitución mecánica mediante bomba, motor, variador y alimentación fotovoltaica. Estos parámetros son referenciales y deben ajustarse para cada emplazamiento con la topografía y la geotecnia de detalle.

$$Q_{20,i} = \frac{V_i}{(20 \times 8 \times 3600)} \quad (6.5.1)$$

$$Q_{10\%,i} = 0,10 \times Q_{\text{sector},i} \quad (6.5.2)$$

$$Q_{\text{op},i} = \text{máx}(Q_{10\%,i}; Q_{20,i}) \quad (6.5.3)$$

$$t_{\text{bombeo},i} = \frac{V_i}{(Q_{\text{op},i} \times 8 \times 3600)} \quad (6.5.4)$$

El término Q_{20} asegura que el volumen pueda movilizarse en un máximo de veinte días solares, mientras que $Q_{10\%}$ evita dimensionar equipos excesivamente pequeños respecto del caudal disponible en el sector. El valor obtenido corresponde a la capacidad de diseño del sistema de bombeo y no implica que ese caudal pueda derivarse en toda condición de prorrata.

La operación real se restringió mediante el caudal efectivamente autorizado por la organización de usuarios. Bajo prorrata, el caudal disponible se calculó proporcionalmente y se limitó la entrega a la fracción que pueda derivarse sin afectar los turnos del canal. Cuando el caudal disponible resulte inferior al caudal de diseño, el sistema opera con variador de frecuencia, menor número de horas o ciclos parciales.

$$Q_{\text{disp},p} = Q_{\text{sector}} \times \frac{p}{100} \quad (6.5.5)$$

$$Q_{\text{ef},i,p} = \min(Q_{\text{op},i}; \alpha_{\text{aut}} \times Q_{\text{disp},p}) \quad (6.5.6)$$

6.6 PREDIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS Y PÉRDIDAS DE CARGA

El diámetro preliminar se obtuvo a partir del caudal de operación y una velocidad objetivo compatible con conducciones de riego. Luego se seleccionó el diámetro nominal comercial inmediatamente superior y se recalcularon la velocidad y las pérdidas con el diámetro interior efectivo. Este último depende del material y de la relación dimensional estándar (SDR), por lo que la ingeniería posterior deberá reemplazar el diámetro nominal por el diámetro interior real de la tubería seleccionada.

$$D_0 = \left(\frac{4 \times Q_{\text{op}}}{\pi \times v_{\text{obj}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.6.1)$$

$$v = \frac{4 \times Q_{\text{op}}}{\pi \times D_i^2} \quad (6.6.2)$$

$$h_f = f \times \left(\frac{L}{D_i} \right) \times \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (6.6.3)$$

$$h_s = \Sigma K \times \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (6.6.4)$$

La pérdida total se calculó separadamente para la conducción de entrada y la de salida. En la etapa de prefactibilidad se utilizaron longitudes y accesorios representativos; el diseño definitivo deberá incorporar el perfil longitudinal, válvulas, cambios de dirección, piezas especiales, condiciones de succión, descarga y la rugosidad del material.

6.7 ALTURA MANOMÉTRICA Y POTENCIA DE BOMBEO

La altura manométrica total se obtuvo sumando la altura geométrica, las pérdidas distribuidas, las pérdidas singulares y la carga residual requerida en la descarga. La entrada y la salida fueron evaluadas de manera independiente, porque un tranque puede llenarse por gravedad y requerir elevación para aprovechar el volumen inferior, o presentar bombeo en ambos sentidos.

$$HMT = H_g + h_f + h_s + H_r \quad (6.7.1)$$

$$P_h = \frac{\rho \times g \times Q_{op} \times HMT}{1\,000} \quad (6.7.2)$$

$$P_e = \frac{P_h}{(\eta_b \times \eta_m \times \eta_{VFD})} \quad (6.7.3)$$

La potencia del motor se seleccionó sobre la potencia eléctrica calculada, utilizando el tamaño comercial inmediatamente superior y una reserva compatible con la incertidumbre de prefactibilidad. El punto de funcionamiento deberá verificarse posteriormente con las curvas Q-H y de eficiencia del fabricante. En el resultado consolidado, catorce tranques requieren elevación mecánica y el Tranco 11 no incorpora bombeo en el escenario base.

6.8 RECURSO SOLAR Y SIMULACIÓN HORARIA

El dimensionamiento fotovoltaico se realizó con bombeo directo, sin baterías. El tranque funciona como almacenamiento hidráulico, de modo que la energía solar disponible durante el día se transforma en volumen bombeado y se acumula para su uso posterior. La configuración evita incorporar almacenamiento electroquímico, sus pérdidas y reposiciones, manteniendo como sensibilidad una alternativa híbrida o conectada a red solo cuando la continuidad operacional lo justifique.

Las series originales descargadas para cada sector, junto con los reportes emitidos por el Explorador Solar, se encuentran contenidas en el Anexo 6; su procesamiento y aplicación al dimensionamiento se desarrollan en el Anexo 5.

Para verificar los supuestos empleados en el dimensionamiento energético, la **Tabla 14** presenta los parámetros de control del reporte fotovoltaico representativo.

Tabla 14 Parámetros de control del reporte fotovoltaico representativo

Parámetro	Valor de referencia	Uso en la aplicación
Configuración	Arreglo fijo inclinado	Base de la simulación.
Inclinación	32°	Orientación adoptada.
Azimut	0°	Parámetro del Explorador Solar.
Eficiencia del inversor	96%	Conversión CC/CA de control.
Pérdidas globales	14%	Contraste del desempeño.
Generación diaria por 1 kWp	4,0 kWh/día	Control de orden de magnitud.
Generación anual por 1 kWp	1,62 MWh/año	Validación anual.
Factor de planta	19%	Control de consistencia.

Fuente: Elaboración propia a partir del Reporte de Generación Fotovoltaica del Explorador Solar utilizado para el Sector 1; véase Anexo 6..

Las series horarias de los tres sectores se normalizaron a una potencia instalada de 1 kWp. Para cada hora, la energía generada se multiplicó por la potencia fotovoltaica candidata y se transformó en volumen bombeado mediante la HMT y la eficiencia total del sistema.

$$E_{FV,s,h} = P_{FV} \times y_{s,h} \quad (6.8.1)$$

$$V_{E,s,h} = \frac{3,6 \times 10^6 \times \eta_{tot} \times E_{FV,s,h}}{\rho \times g \times HMT} \quad (6.8.2)$$

$$V_{b,s,h} = \min(Q_{op} \times 3\,600; V_{E,s,h}; V_{pend}) \quad (6.8.3)$$

6.9 DIMENSIONAMIENTO DEL CAMPO FOTOVOLTAICO

La potencia fotovoltaica se determinó iterativamente. Primero se obtuvo un valor inicial a partir de la energía diaria requerida y la generación específica del sector. Luego se simuló el bombeo hora a hora, verificando que el volumen objetivo se completara dentro del plazo máximo de veinte días y que la potencia entregada fuese compatible con la bomba, el motor y el variador.

$$E_{día,req} = P_e \times h_b \quad (6.9.1)$$

$$P_{FV,0} = \frac{E_{día,req}}{(HSP_s \times PR_s)} \quad (6.9.2)$$

La potencia adoptada corresponde al menor tamaño que satisface el volumen objetivo en el escenario de diseño. La verificación horaria es prioritaria sobre el uso exclusivo de promedios anuales, porque reproduce los meses y horas de menor generación dentro de la temporada de riego.

La **Tabla 15** establece los criterios de aceptación utilizados para verificar que el sistema fotovoltaico pueda cumplir el objetivo de bombeo dentro de la ventana operativa definida.

Tabla 15 Criterios de aceptación del sistema fotovoltaico

Criterio	Condición de aceptación
Plazo del ciclo	Completar el volumen objetivo en un máximo de 20 días, con 8 h/día.
Potencia de bombeo	Cubrir la potencia eléctrica del punto de operación.
Operación horaria	No superar el caudal nominal ni el volumen disponible.
Variación estacional	Verificar con la serie horaria del sector correspondiente.
Sin baterías	Operación directa durante horas solares.
Compatibilidad hidráulica	HMT y DN recalculados con diámetro interior real en ingeniería posterior.

Fuente: elaboración propia.

6.10 COSTO DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN FOTOVOLTAICA

Para comparar las alternativas se aplicó una estructura paramétrica homogénea. El costo del campo fotovoltaico se estimó mediante la potencia instalada y el costo unitario por kWp. El conjunto bomba, motor y variador se estimó mediante la potencia eléctrica seleccionada. Estos valores representan el núcleo del sistema; el presupuesto total debe agregar estructura, tableros, protecciones, cableado, puesta a tierra, cámara de bombas, instrumentación, válvulas, montaje, pruebas y puesta en marcha.

Para homogeneizar la comparación entre alternativas con impulsión, **Tabla 16** presenta los supuestos de costo aplicados al módulo fotovoltaico.

Tabla 16 Supuestos de costo del módulo fotovoltaico

Concepto	Supuesto aplicado	Alcance
Sistema FV instalado	\$1.000.000 por kWp	Costo paramétrico de prefactibilidad.
Bomba + motor + variador	\$600.000 por kW eléctrico	Equipo electromecánico principal.
Temporada de riego	35 semanas	Base de proyección operacional.
Operación máxima	40 h/semana; 1.400 h/temporada	Envolverte máxima, no uso obligatorio.
Electricidad comprada	\$0 en escenario base	Bombeo FV directo.
Tranque 11	Sin CAPEX de elevación base	No requiere bombeo.

Fuente: matriz de estimación fotovoltaica de tres sectores desarrollada para la tesina.

$$\text{CAPEX}_{\text{FV},i} = P_{\text{FV},i} \times 1\,000\,000 \text{ CLP/kWp} \quad (6.10.1)$$

$$\text{CAPEX}_{\text{EM},i} = P_{\text{e,sel},i} \times 600\,000 \text{ CLP/kW} \quad (6.10.2)$$

6.11 COSTO DE OPERACIÓN POR TEMPORADA

El costo de operación del sistema de elevación no se calculó como consumo de electricidad de red. Se estimó mediante mantención del campo fotovoltaico, mantención del conjunto electromecánico, inspección y telemetría, incorporando una contingencia operacional. El costo corresponde a una temporada de riego y se aplicó a los catorce tranques con bombeo.

$$\text{OPEX}_{\text{base},i} = 0,01 \times \text{CAPEX}_{\text{FV},i} + 0,025 \times \text{CAPEX}_{\text{EM},i} + 300\,000 \text{ CLP} \quad (6.11.1)$$

$$\text{OPEX}_{\text{prob},i} = \text{OPEX}_{\text{base},i} \times 1,15 \quad (6.11.2)$$

La **Tabla 17** presenta la estimación del costo probable de elevación fotovoltaica por temporada para las alternativas que requieren bombeo.

Tabla 17 Costo probable de elevación fotovoltaica por temporada

Tranque	OPEX probable por temporada	Condición
1	\$1.734.023	Elevación fotovoltaica
2	\$2.357.770	Elevación fotovoltaica
3	\$1.236.553	Elevación fotovoltaica
4	\$1.346.343	Elevación fotovoltaica
5	\$1.154.821	Elevación fotovoltaica
6	\$1.316.718	Elevación fotovoltaica
7	\$1.326.518	Elevación fotovoltaica
8	\$3.591.637	Mayor costo estacional del conjunto
9	\$2.137.859	Elevación fotovoltaica
10	\$2.304.060	Elevación fotovoltaica
11	\$0	No requiere elevación en el escenario base
12	\$1.624.859	Elevación fotovoltaica
13	\$1.270.016	Elevación fotovoltaica
14	\$1.524.894	Elevación fotovoltaica
15	\$1.533.195	Elevación fotovoltaica

Fuente: resultados de la matriz de costos fotovoltaicos; montos redondeados al peso.

El módulo de elevación obtuvo un OPEX base agregado de \$21.268.928 y una contingencia de 15% equivalente a \$3.190.339. El OPEX probable agregado asciende a aproximadamente \$24.459.267 por temporada. El promedio para los catorce tranques con elevación es de \$1.747.090 por temporada. La diferencia de un peso respecto de la suma de valores mostrados se debe al redondeo individual de las filas.

6.12 COSTOS CIVILES, IMPERMEABILIZACIÓN Y TUBERÍAS

Los costos civiles se calcularon con las cantidades determinadas en Civil 3D y los precios unitarios derivados del DT-18 trabajado para la tesina. Para mantener una fecha base homogénea se adoptaron precios medios dentro de los rangos analizados. La geomembrana se valorizó separando suministro e instalación, y las tuberías se estimaron según longitud, diámetro nominal, material, accesorios y condición de montaje.

Los precios de excavación, relleno y demás partidas civiles compatibles se encuentran respaldados en el extracto del DT-18 presentado en el Anexo 4. Los supuestos correspondientes a geomembrana, tuberías, bombeo y sistema fotovoltaico se encuentran desarrollados en el modelo integrado del Anexo 5.

Con el propósito de mantener criterios económicos homogéneos la **Tabla 18** consolida los supuestos de prefactibilidad aplicados a las partidas civiles

Tabla 18 Supuestos económicos consolidados de prefactibilidad

Partida	Supuesto aplicado	Unidad / criterio
Excavación con maquinaria	\$3.909	CLP/m ³
Relleno estructural	\$7.647,5	CLP/m ³ ; selección, colocación y compactación
Geomembrana HDPE 1,0 mm	\$3.500	CLP/m ² de suministro
Instalación de geomembrana	\$1.500	CLP/m ²
Tubería de entrada y salida	Según DN y longitud	Precio por metro más accesorios y montaje
Ingeniería y administración	8%	Sobre costos directos definidos
Contingencia de inversión	10%	Sobre subtotal previo a contingencia

Fuente: elaboración propia a partir del DT-18 actualizado, cubitaciones técnicas y supuestos del modelo económico; véanse los Anexos 4 y 5.

$$C_{exc,i} = V_{exc,i} \times 3\,909 \text{ CLP/m}^3 \quad (6.12.1)$$

$$C_{rel,i} = V_{rel,i} \times 7\,647,5 \text{ CLP/m}^3 \quad (6.12.2)$$

$$C_{geo,i} = A_{compra,i} \times (3\,500 + 1\,500) \text{ CLP/m}^2 \quad (6.12.3)$$

$$C_{tub,i} = \sum_{j=1}^{n_i} L_{ij} \times PU_{DN,j} + C_{acc,i} + C_{mont,i} \quad (6.12.4)$$

El área de compra de geomembrana incluye la superficie 3D del fondo y taludes, traslajos, mermas, retornos y zanjas de anclaje. Los costos de tubería deben actualizarse cuando se defina el material y SDR, porque el diámetro interior modifica simultáneamente el precio, las pérdidas de carga, la potencia de bombeo y la potencia fotovoltaica.

6.13 CONSOLIDACIÓN DEL MODELO ECONÓMICO

El costo total de cada alternativa se obtuvo sumando movimiento de tierras, impermeabilización, tuberías, obras de entrada y salida, sistema fotovoltaico, conjunto electromecánico, ingeniería y contingencia. El modelo económico consolidado se proyectó a treinta años e incorporó costos de operación por temporada y reposiciones de equipos durante el horizonte, incluida una reposición principal considerada en el año 12.

El detalle de la inversión por alternativa, los costos de operación, las reposiciones y la proyección a treinta años se encuentra desarrollado en el modelo editable del Anexo 5.

$$CAPEX_i = C_{civ,i} + C_{imp,i} + C_{tub,i} + C_{FV,i} + C_{EM,i} + C_{ing,i} + C_{cont,i} \quad (6.13.1)$$

La **Tabla 19** presenta un control agregado de consistencia del modelo económico aplicado a las quince alternativas.

Tabla 19 Control agregado de consistencia del modelo aplicado

Indicador de control	Resultado consolidado	Interpretación metodológica
CAPEX de los 15 tranques	\$11.983.194.307	Suma de inversión estimada en todas las alternativas.
Costo medio de inversión	\$12.531/m ³	CAPEX total dividido por volumen útil consolidado.
OPEX probable de elevación FV	\$24.459.267/temporada	Submódulo de bombeo de 14 tranques.
OPEX consolidado del modelo	\$53.215.260/temporada	Costo operacional total utilizado en la evaluación económica.
Horizonte de evaluación	30 años	Incluye mantenciones y reposiciones.

Fuente: análisis económico actualizado de los 15 tranques del Canal Buzeta.

Estos resultados se incorporan en el presente capítulo como verificación de que la metodología fue efectivamente aplicada. La comparación por tranque, la rentabilidad, la sensibilidad y la recomendación de construir o no construir corresponden al Capítulo 7.

6.14 CONVERSIÓN DE PRECIOS PRIVADOS A PRECIOS SOCIALES

La evaluación social se preparó desagregando cada partida en mano de obra, materiales, equipos, combustibles, componentes importados, impuestos y transferencias. No se aplicó un factor único al presupuesto total. Los factores vigentes para 2026 se aplicaron a la base correspondiente y los impuestos indirectos se excluyeron de los costos sociales.

Para efectuar la conversión desde precios privados a precios sociales, la **Tabla 20** resume los parámetros sociales utilizados para el año base 2026.

Tabla 20 Parámetros sociales utilizados para el año 2026

Parámetro	Valor 2026	Aplicación
Tasa social de descuento	5,5%	Actualización de costos y beneficios.
Mano de obra calificada	0,97	Profesionales y técnicos calificados.
Mano de obra semicalificada	0,95	Operadores, maestros y montadores.
Mano de obra no calificada	0,91	Jornales y ocupaciones elementales.
Factor social de la divisa	1,00	Usar 1,003450 sin aproximar cuando corresponda.
Energía eléctrica baja tensión	\$124,8/kWh	Escenario comparativo con energía de red.

Fuente: Sistema Nacional de Inversiones, Precios Sociales 2026.

$$C_{\text{soc},i} = \sum_{j=1}^{m_i} C_{\text{priv},ij} \times FC_j - \text{Imp}_i - \text{Transf}_i \quad (6.14.1)$$

La situación sin proyecto representa la operación actual del canal bajo prorrata, turnos y ausencia de regulación local. La situación con proyecto incorpora inversión, OPEX, reposiciones y los beneficios atribuibles a una mejora verificable en oportunidad, continuidad o superficie efectivamente regada. El beneficio no se igualó automáticamente al volumen almacenado; se limitó por los ciclos factibles, la disponibilidad real, la demanda agrícola y el margen productivo incremental.

$$V_{\text{reg},an,i} = \min(V_i \times N_{\text{fact},i}; V_{\text{deriv},i}; V_{\text{util},i}) \quad (6.14.2)$$

$$B_{\text{inc},t} = \sum_{c=1}^{n_{\text{cult}}} A_{c,t} \times (MB_{\text{CP},c,t} - MB_{\text{SP},c,t}) \quad (6.14.3)$$

$$\text{VAN}_{\text{soc}} = -I_{\text{soc}} + \sum_{t=1}^{30} \frac{B_t - C_t}{(1 + 0,055)^t} + \frac{\text{VR}_{30}}{(1 + 0,055)^{30}} \quad (6.14.4)$$

6.15 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y PRIORIZACIÓN

La priorización se estructuró en dos niveles. Primero se aplicaron condiciones excluyentes: compatibilidad normativa, disponibilidad de agua, factibilidad predial, estabilidad geotécnica y posibilidad hidráulica de llenado y entrega. Luego se compararon las alternativas mediante indicadores físicos, energéticos, económicos y sociales.

La **Tabla 21** identifica las variables sometidas a análisis de sensibilidad, con el fin de evaluar la robustez de los resultados frente a cambios en los principales supuestos.

Tabla 21 Variables sometidas a sensibilidad

Grupo	Variables
Hidráulicas	Prorrata, caudal autorizable, HMT, rugosidad, DN, SDR y pérdidas singulares.
Operacionales	Horas solares, máximo de días, número de ciclos y programación de turnos.
Fotovoltaicas	Generación por sector, pérdidas, degradación, kWp y eficiencia del conjunto.
Constructivas	Volúmenes, superficie de geomembrana, fletes y aptitud del material excavado.
Económicas	PU de excavación, relleno, geomembrana, tuberías, FV, OPEX y reposiciones.
Sociales y productivas	Usuarios, hectáreas, demanda, cultivos, margen y tasa de descuento.

Fuente: elaboración propia.

6.16 LIMITACIONES Y CONTROLES DE CALIDAD

Con el objeto de explicitar el alcance de prefactibilidad del estudio, la siguiente **Tabla 22** presenta las principales limitaciones de la aplicación y las medidas de control requeridas.

Tabla 22 Limitaciones de la aplicación y medida de control

Limitación	Efecto potencial	Control requerido
Topografía de prefactibilidad	Error en volumen, longitud y HMT.	Levantamiento topográfico de detalle.
Geotecnia no disponible	Incertidumbre en estabilidad y reutilización.	Calicatas, sondajes y ensayos.
DN sin SDR definitivo	Error en diámetro interior y pérdidas.	Recalcular con tubería comercial seleccionada.

Limitación	Efecto potencial	Control requerido
Caudal autorizable no definido	Ciclo incompatible con turnos o prorrata.	Acuerdo operacional con la OUA.
Tres sectores solares representativos	Variación local no capturada completamente.	Validar coordenada y serie del sitio definitivo.
Costos paramétricos	Diferencia con precio de mercado.	Tres cotizaciones comparables y fecha base.
Curvas de bomba no seleccionadas	Punto de operación incierto.	Verificación Q-H, eficiencia y cavitación.
Beneficios productivos preliminares	Riesgo de sobreestimar rentabilidad.	Modelo agrícola incremental y validación de usuarios.

Fuente: elaboración propia.

6.17 SÍNTESIS DE LA APLICACIÓN METODOLÓGICA

La aplicación metodológica consolidó quince alternativas con trazabilidad territorial, hidráulica, energética y económica. El caudal de operación se determinó individualmente, utilizando ocho horas solares diarias, un máximo de veinte días y una referencia mínima equivalente al 10% del caudal normal del sector. Sobre este caudal se predimensionaron las tuberías, se calcularon las pérdidas, la HMT, la potencia de bombeo y el sistema fotovoltaico correspondiente a uno de tres sectores solares.

El análisis de costos incorporó movimiento de tierras, geomembrana, tuberías, obras hidráulicas, bombeo, generación fotovoltaica, operación estacional, ingeniería, contingencias y reposiciones. La aplicación permitió comprobar que catorce tranques requieren elevación y que el Tranque 11 puede operar sin bombeo en el escenario base. Los productos del capítulo alimentan directamente las tablas de resultados, la evaluación económica-social y la recomendación final del Capítulo 7.

7 RESULTADOS

El capítulo expone los resultados obtenidos al aplicar la propuesta metodológica del Capítulo 5 y la secuencia técnica desarrollada en el Capítulo 6. La presentación mantiene trazabilidad desde la identificación territorial, la sectorización HEC-RAS y la cubicación en Civil 3D, hasta la estimación del sistema de impulsión fotovoltaica, el presupuesto privado, la conversión a precios sociales y la evaluación económico-social a 30 años. Las ecuaciones se incorporan como objetos editables de Word y los valores presentados en este capítulo provienen del modelo integrado y formulado en Excel, incorporado como Anexo 5, el cual mantiene la trazabilidad desde los datos técnicos y geométricos hasta los resultados económicos y sociales.

7.1 ALCANCE, TRAZABILIDAD Y CRITERIO DE INTERPRETACIÓN

Los resultados corresponden a una evaluación de prefactibilidad. En consecuencia, permiten comparar las quince alternativas y establecer prioridades relativas, pero no sustituyen el diseño definitivo de las obras. La geometría conceptual empleada es la desarrollada en la Figura 5 del capítulo anterior: llenado desde el canal, vaso con taludes de referencia, revancha de seguridad y restitución gravitacional o mecánica según la relación altimétrica.

La numeración válida corresponde a los Tranques 1 a 15 de la matriz técnica. El KMZ se utiliza para ubicación y control espacial; los volúmenes útiles, las necesidades de impulsión, los caudales sectoriales y los resultados económicos proceden de las matrices técnicas consolidadas.

7.2 RESULTADOS FÍSICOS Y GEOMÉTRICOS

El volumen útil total de las quince alternativas asciende a 956.282 m³. La excavación consolidada alcanza 918.176 m³, el relleno 335.558 m³ y la superficie preliminar de impermeabilización 284.542 m². Los Tranques 1 a 5 disponen de cubicaciones directas en Civil 3D. Para los Tranques 6 a 15, excavación, relleno y geomembrana se normalizaron para cerrar los totales físicos consolidados, por lo que deben sustituirse por cubicaciones individuales antes de preparar un presupuesto constructivo.

$$\eta_{fis,i} = \frac{V_{\text{útil},i}}{(V_{\text{exc},i} + V_{\text{rel},i})} \quad (7.2.1)$$

La eficiencia física representa la cantidad de agua útil obtenida por unidad de tierra movilizada. Debe interpretarse junto con la aptitud geotécnica del material, la distancia de transporte y el posible déficit de relleno estructural.

La **Tabla 23** consolida los resultados físicos de las quince alternativas, incluyendo volumen útil, movimientos de tierra y condición hidráulica de entrega.

Tabla 23 Resultados físicos consolidados de los 15 tranques.

Tranque	Sector	Volumen útil (m³)	Excavación (m³)	Relleno (m³)	Condición hidráulica
1	El Tambo	51.067	55.793	23.161	Impulsión de salida
2	El Tambo	19.358	38.860	11.522	Impulsión de entrada y salida
3	El Tambo	51.415	124.689	9.318	Impulsión de salida
4	El Tambo	23.168	71.560	16.038	Impulsión de salida
5	El Tambo	32.737	47.986	29.124	Impulsión de salida
6	Colliguay	91.058	67.754	28.818	Impulsión de entrada y salida
7	Colliguay	60.089	44.711	19.017	Impulsión de salida
8	Colliguay	131.391	97.764	41.583	Impulsión requerida
9	Tahuinco	94.459	70.284	29.895	Impulsión de entrada
10	Tahuinco	25.985	19.335	8.224	Impulsión requerida
11	Tahuinco	101.867	75.796	32.239	Gravitacional; sin bombeo base
12	Limáhuida / Los Loros / Socavón	59.158	44.018	18.723	Impulsión de entrada
13	Limáhuida / Los Loros / Socavón	24.194	18.002	7.657	Impulsión requerida
14	Cañas I y II	96.421	71.744	30.516	Impulsión de entrada
15	Cañas I y II	93.915	69.880	29.723	Impulsión de entrada

Fuente: elaboración propia.

7.3 RESULTADOS DE OPERACIÓN BAJO ESCENARIOS DE PRORRATA

La operación se evaluó con el caudal normal de cada sector y tres escenarios de prorrata. El escenario crítico adopta 6% de prorrata y turnos cada 20 días; el escenario moderado, 20% y turnos cada 10 días; y el escenario medio, 45% y turnos cada 7 días. Se utilizó 90% de eficiencia de captación, ocho horas efectivas de operación diaria y una temporada de 180 días. Los niveles de prorrata utilizados para estructurar los escenarios fueron definidos considerando el registro histórico presentado en el Anexo 3.

$$Q_{\text{disp},i,s} = Q_{\text{sector},i} \times p_s \quad (7.3.1)$$

$$t_{h,i,s} = \frac{V_i}{3,6 \times \eta_{\text{cap}} \times Q_{\text{disp},i,s}} \quad (7.3.2)$$

$$t_{d,i,s} = \frac{t_{h,i,s}}{h_d} \quad (7.3.3)$$

$$N_{\text{ef},i,s} = \min\left(\frac{D_{\text{temp}}}{t_{\text{turno},s}} ; \frac{D_{\text{temp}}}{t_{d,i,s}}\right) \quad (7.3.4)$$

$$V_{\text{anual},i,s} = V_i \times N_{\text{ef},i,s} \times d_{\text{op}} \quad (7.3.5)$$

En el escenario crítico, los Tranques 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12 y 13 completan los nueve ciclos programados. Los Tranques 6, 8, 9, 11, 14 y 15 quedan restringidos por el tiempo de llenado. Los casos más condicionados son los Tranques 14 y 15, con aproximadamente 46,2 y 45,0 días por llenado.

Para evaluar la factibilidad de operación bajo la condición más exigente, la siguiente **Tabla 24** presenta los resultados operacionales del escenario crítico.

Tabla 24 Resultados operacionales del escenario crítico

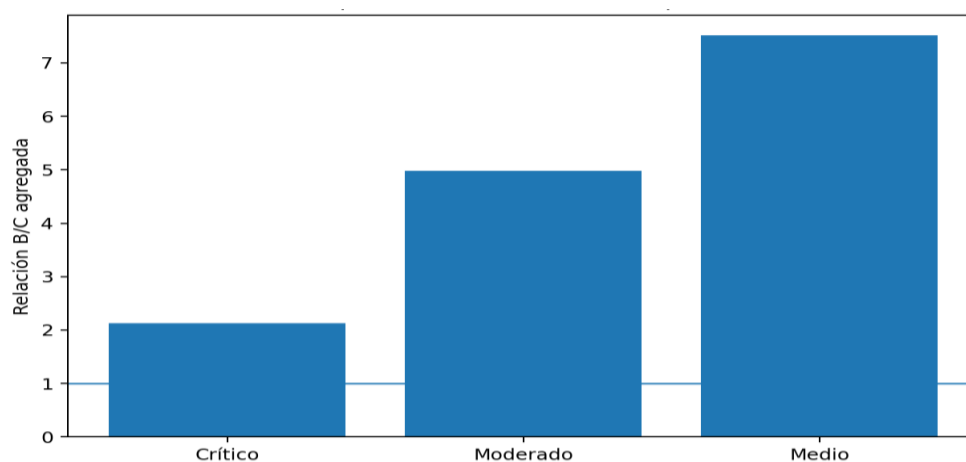
T	Q sector (L/s)	Llenado crítico (días)	Ciclos efectivos	Volumen anual (m³)	Área equivalente (ha)	Condición de ciclo	Impulsión
1	3.000	10,95	9,00	413.643	33,16	Compatible	Impulsión de salida
2	3.000	4,15	9,00	156.800	12,57	Compatible	Impulsión de entrada y salida
3	3.000	11,02	9,00	416.462	33,38	Compatible	Impulsión de salida
4	3.000	4,97	9,00	187.661	15,04	Compatible	Impulsión de salida
5	3.000	7,02	9,00	265.170	21,25	Compatible	Impulsión de salida
6	2.865	20,44	8,81	721.815	57,86	Llenado restringe	Impulsión de entrada y salida
7	2.865	13,49	9,00	486.721	39,01	Compatible	Impulsión de salida

T	Q sector (L/s)	Llenado crítico (días)	Ciclos efectivos	Volumen anual (m³)	Área equivalente (ha)	Condición de ciclo	Impulsión
8	2.865	29,49	6,10	721.815	57,86	Llenado restringe	Impulsión requerida
9	2.612	23,25	7,74	658.074	52,75	Llenado restringe	Impulsión de entrada
10	2.612	6,40	9,00	210.478	16,87	Compatible	Impulsión requerida
11	2.612	25,08	7,18	658.074	52,75	Llenado restringe	Gravitacional; sin bombeo base
12	2.164	17,58	9,00	479.180	38,41	Compatible	Impulsión de entrada
13	2.164	7,19	9,00	195.971	15,71	Compatible	Impulsión requerida
14	1.341	46,23	3,89	337.855	27,08	Llenado restringe	Impulsión de entrada
15	1.341	45,03	4,00	337.855	27,08	Llenado restringe	Impulsión de entrada

Fuente: elaboración propia.

Una vez caracterizadas las alternativas de acumulación y definidos los caudales de operación por sector, se evaluó su comportamiento bajo distintos niveles de disponibilidad hídrica. La prorrata condiciona directamente el caudal efectivamente disponible para el llenado de los tranques y, por consiguiente, el tiempo requerido para completar cada ciclo de regulación. Para visualizar este efecto y comparar la respuesta operacional del sistema frente a distintos grados de restricción, el **Gráfico 2** presenta los escenarios de prorrata considerados en la evaluación.

Gráfico 2 Comparación de escenarios de prorrata



Fuente: elaboración propia

7.4 RESULTADOS DE IMPULSIÓN Y SISTEMA FOTOVOLTAICO

La evaluación altimétrica determinó que catorce alternativas requieren elevación mecánica en alguna etapa de llenado o restitución. El Tranque 11 no incorpora bombeo en el escenario base. El sistema se modeló como bombeo fotovoltaico directo, sin baterías, utilizando el tranque como almacenamiento hidráulico.

Los resultados se obtuvieron mediante el procesamiento de los registros horarios del Anexo 6 en el modelo de dimensionamiento incluido en el Anexo 5.

$$HMT = H_{geom} + h_f + h_s + H_{res} \quad (7.4.1)$$

$$P_h = \frac{\rho g Q HMT}{1.000} \quad (7.4.2)$$

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_b \eta_m \eta_v} \quad (7.4.3)$$

$$C_{FV,i} = P_{FV,i} \times PU_{FV} \quad (7.4.4)$$

$$OPEX_{FV,i} = (0,01 C_{FV,i} + 0,025 C_{EM,i} + C_{tel}) \times 1,15 \quad (7.4.5)$$

El OPEX fotovoltaico formulado asciende a \$24.459.266 por temporada. El Tranque 8 presenta el mayor costo operacional del módulo de elevación, mientras que el Tranque 11 mantiene costo nulo de bombeo en el escenario base.

7.5 COSTOS PRIVADOS DE INVERSIÓN

El presupuesto privado se construyó a partir de las cantidades físicas y de los precios unitarios definidos en la aplicación metodológica: \$3.909/m³ para excavación, \$7.647,5/m³ para relleno estructural, \$3.500/m² para suministro de geomembrana y \$1.500/m² para instalación. Se incorporó 7% del costo civil para obras hidráulicas y de seguridad, 8% sobre el costo directo para ingeniería y administración y 10% de contingencia sobre el subtotal previo.

$$C_{exc,i} = V_{exc,i} \times PU_{exc} \quad (7.5.1)$$

$$C_{rel,i} = V_{rel,i} \times PU_{rel} \quad (7.5.2)$$

$$C_{geo,i} = A_{geo,i} \times (PU_s + PU_{inst}) \quad (7.5.3)$$

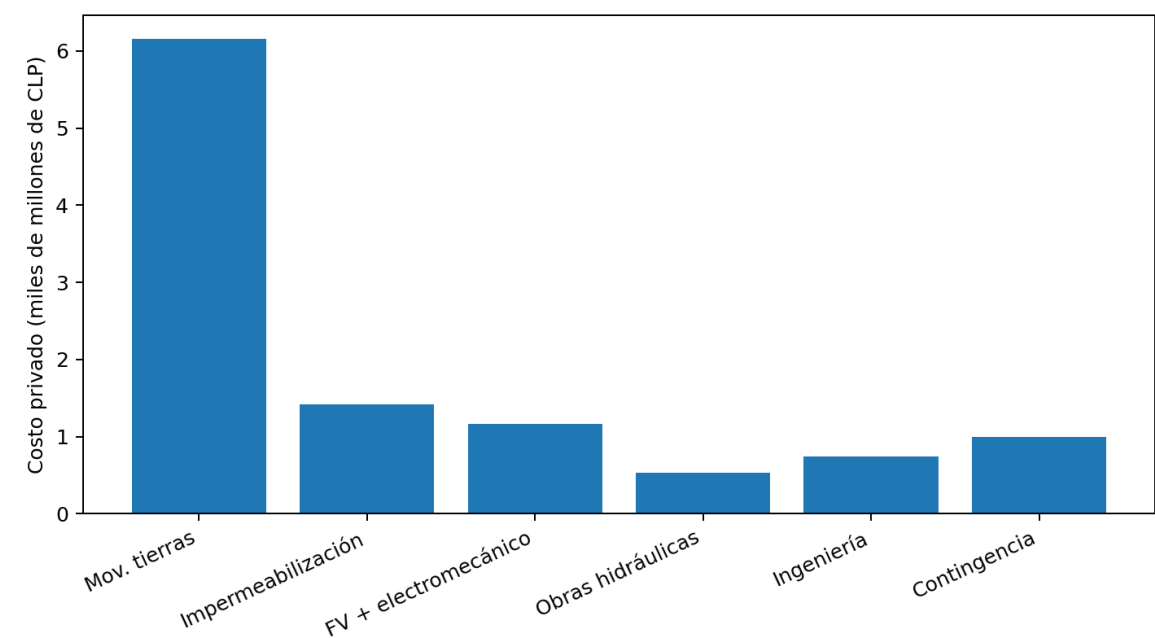
$$CAPEX_{priv,i} = C_{dir,i} + C_{ing,i} + C_{cont,i} \quad (7.5.4)$$

El CAPEX privado total formulado es \$11.014.068.213. El movimiento de tierras representa 55,9% del total; la impermeabilización, 12,9%; los sistemas fotovoltaicos y electromecánicos, 10,6%; y el resto corresponde a obras hidráulicas, ingeniería y contingencias.

La evaluación de prefactibilidad requiere identificar no solo el costo total de cada alternativa, sino también la participación relativa de las principales partidas

que explican la inversión inicial. En los acumuladores laterales analizados, estas diferencias responden principalmente a las características geométricas de cada sitio, los movimientos de tierra, la impermeabilización, las obras de conexión y, cuando corresponde, los sistemas de impulsión. En este contexto, el **Gráfico 3** muestra la composición del CAPEX privado formulado, permitiendo reconocer los componentes de mayor incidencia sobre la inversión.

Gráfico 3 Composición del CAPEX privado formulado.



Fuente: elaboración propia

La **Tabla 25** desagrega la composición del CAPEX privado formulado, permitiendo identificar el peso relativo de las principales partidas de inversión.

Tabla 25 Composición del CAPEX privado formulado.

Tranque	CAPEX privado (MM\$)	CAPEX social (MM\$)	CAPEX privado (\$/m³)	CAPEX social (\$/m³)
1	696,7	577,1	13.643	11.302
2	483,2	401,4	24.959	20.734
3	870,2	720,7	16.926	14.017
4	625,9	518,3	27.014	22.372
5	640,6	529,9	19.568	16.187
6	857,5	709,7	9.417	7.794
7	589,8	488,5	9.816	8.130
8	1.366,5	1.132,7	10.400	8.621
9	944,5	782,5	9.999	8.284

Tranque	CAPEX privado (MM\$)	CAPEX social (MM\$)	CAPEX privado (\$/m³)	CAPEX social (\$/m³)
10	362,8	301,9	13.964	11.618
11	882,9	729,7	8.667	7.163
12	602,7	499,4	10.188	8.442
13	274,8	228,1	11.360	9.428
14	918,6	760,4	9.527	7.886
15	897,4	742,9	9.556	7.911

Fuente: elaboración propia

7.6 CONVERSIÓN A PRECIOS SOCIALES

La conversión no se realizó mediante un único factor global. Cada partida se trató de acuerdo con su composición económica, eliminando el IVA y aplicando factores diferenciados para mano de obra, equipos, materiales y componentes importados. Se utilizó una tasa social de descuento de 5,5% y un horizonte de 30 años.

$$C_{\text{soc},j} = \frac{C_{\text{priv},j}}{1 + \text{IVA}} \times FC_j \quad (7.6.1)$$

El CAPEX social consolidado asciende a \$9.123.280.246, equivalente a 9.540 CLP por m³ de capacidad útil. El OPEX social anual formulado alcanza \$42.235.127.

7.7 BENEFICIOS AGRÍCOLAS Y SUPERFICIE EQUIVALENTE

Los beneficios se estimaron mediante el método del presupuesto. El patrón con proyecto se transfirió del modelo Canal Higueral e incluye alfalfa, damasco por surco, damasco por goteo y nogal por goteo. La demanda ponderada alcanza 12.475,85 m³/ha/año y el margen estabilizado ponderado \$4.310.455/ha/año, equivalente a \$346/m³.

$$D_{\text{pond}} = \sum_{c=1}^4 w_c \times D_c \quad (7.7.1)$$

$$A_{i,s} = \frac{V_{\text{anual},i,s}}{D_{\text{pond}}} \quad (7.7.2)$$

$$\Delta MB_t = \sum_{c=1}^4 w_{\text{CP},c} \times MB_{\text{CP},c} \times f_{c,t} - \sum_{c=1}^5 w_{\text{SP},c} \times MB_{\text{SP},c} \quad (7.7.3)$$

$$B_{i,s,t} = A_{i,s} \times \Delta MB_t \quad (7.7.4)$$

Los márgenes de la situación sin proyecto permanecen como entradas editables pendientes de validación. Mientras esos valores se mantengan en cero, los beneficios y la rentabilidad representan una aproximación superior. Al completar la hoja de situación base, el Excel recalcula automáticamente los flujos y todos los indicadores.

7.8 FLUJO SOCIAL Y RENTABILIDAD A 30 AÑOS

El flujo incluye inversión en el año 0, beneficios y OPEX entre los años 1 y 30, reposición de inversores en los años 12 y 24, reposición electromecánica en el año 15, rehabilitación parcial de geomembrana en el año 20 y valor residual al término del horizonte.

$$FN_t = B_t - OPEX_t - Rep_t + VR_t - CAPEX_t \quad (7.8.1)$$

$$VAN = \sum_{t=0}^{30} \frac{FN_t}{(1+r)^t} \quad (7.8.2)$$

$$B/C = \frac{VP(\text{Beneficios} + VR)}{VP(\text{Costos})} \quad (7.8.3)$$

En el escenario crítico, el VAN agregado de cribado alcanza \$11.200.283.969 y la relación B/C agregada es 2,12. En el escenario moderado, el B/C asciende a 4,98, y en el escenario medio a 7,51. Estos totales representan la suma de evaluaciones individuales y no una cartera operada simultáneamente.

Para comparar la conveniencia de cada alternativa bajo restricción hídrica, la siguiente **Tabla 26** presenta los indicadores económico-sociales por tranque en el escenario crítico.

Tabla 26 Indicadores económico-sociales por tranque en el escenario crítico.

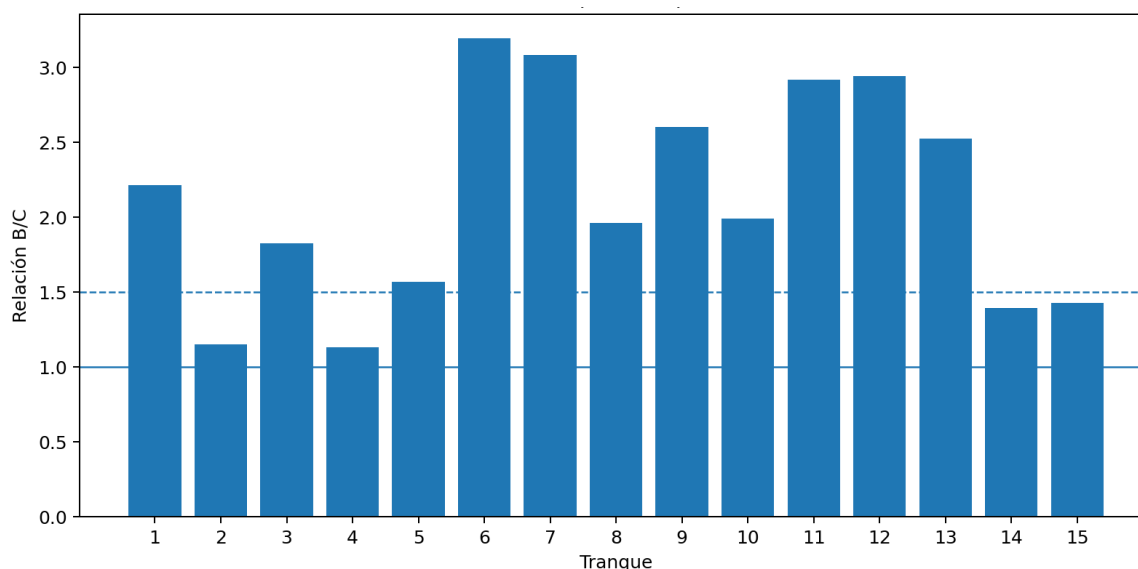
T	Área (ha)	CAPEX social (MM\$)	OPEX social (MM\$/año)	VAN (MM\$)	TIR	B/C	CAE (\$/m³)	Ranking B/C	Resultado
1	33,16	577,1	2,84	768,0	11,5%	2,21	105	7	Rentable robusto
2	12,57	401,4	2,97	70,5	6,6%	1,15	202	14	Rentable marginal
3	33,38	720,7	2,74	638,9	9,9%	1,83	127	10	Rentable robusto
4	15,04	518,3	2,41	72,9	6,4%	1,13	206	15	Rentable marginal
5	21,25	529,9	2,29	326,1	8,8%	1,57	148	11	Rentable robusto
6	57,86	709,7	2,78	1.679,3	14,4%	3,19	73	1	Rentable robusto
7	39,01	488,5	2,34	1.113,4	14,2%	3,08	76	2	Rentable robusto
8	57,86	1.132,7	5,42	1.199,3	10,5%	1,96	119	9	Rentable robusto
9	52,75	782,5	3,57	1.373,3	12,8%	2,60	90	5	Rentable robusto
10	16,87	301,9	2,72	355,1	10,9%	1,99	117	8	Rentable robusto
11	52,75	729,7	1,75	1.464,9	13,5%	2,92	80	4	Rentable robusto

T	Área (ha)	CAPEX social (MM\$)	OPEX social (MM\$/año)	VAN (MM\$)	TIR	B/C	CAE (\$/m³)	Ranking B/C	Resultado
12	38,41	499,4	2,59	1.071,2	13,8%	2,94	79	3	Rentable robusto
13	15,71	228,1	1,76	401,2	12,7%	2,53	92	6	Rentable robusto
14	27,08	760,4	3,05	324,1	7,9%	1,39	167	13	Rentable marginal
15	27,08	742,9	3,02	342,0	8,1%	1,43	164	12	Rentable marginal

Fuente: elaboración propia

Para comparar la conveniencia económico-social de las alternativas bajo una condición exigente de disponibilidad hídrica, se estimó la relación beneficio/costo de cada tranque en el escenario crítico. Este indicador permite contrastar, en términos relativos, los beneficios atribuibles a la regulación y utilización del recurso con los costos asociados a la implementación y operación de cada alternativa. Dado el carácter de prefactibilidad del estudio, los resultados deben interpretarse como un instrumento de comparación y priorización, más que como una decisión definitiva de inversión. El **Gráfico 4** presenta la relación beneficio/costo obtenida para cada alternativa.

Gráfico 4 Relación beneficio/costo individual en el escenario crítico.



Fuente: elaboración propia

7.9 COSTO POR M³ DE CAPACIDAD Y POR M³ REGULADO

Se distinguieron dos indicadores. El costo por m³ de capacidad relaciona la inversión con el volumen geométrico del vaso. El costo anual equivalente por m³ regulado incorpora inversión, operación, mantenciones, reposiciones y el número real de ciclos. Este segundo indicador es más adecuado para comparar el desempeño operacional de las alternativas.

$$C_{\text{cap,soc,i}} = \frac{CAPEX_{\text{soc,i}}}{V_i} \quad (7.9.1)$$

$$FRC = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7.9.2)$$

$$CAE_i = VP(\text{Costos}) \times FRC \quad (7.9.3)$$

$$C_{\text{reg,i}} = \frac{CAE_i}{V_{\text{anual,i}}} \quad (7.9.4)$$

El CAPEX privado medio ponderado es 11.518 CLP/m³ de capacidad y el CAPEX social medio 9.540 CLP/m³. El costo anual equivalente medio alcanza 110 CLP/m³ regulado en el escenario crítico.

Los menores CAE por m³ regulado corresponden a los Tranques 6, 7, 12, 11 y 9. Los mayores costos corresponden a los Tranques 4, 2, 14 y 15. Los dos últimos presentan una geometría relativamente eficiente, pero su menor caudal pasante limita el número de ciclos y encarece el agua regulada.

La **Tabla 27** complementa la evaluación de rentabilidad con indicadores de costo por metro cúbico regulado en el escenario crítico.

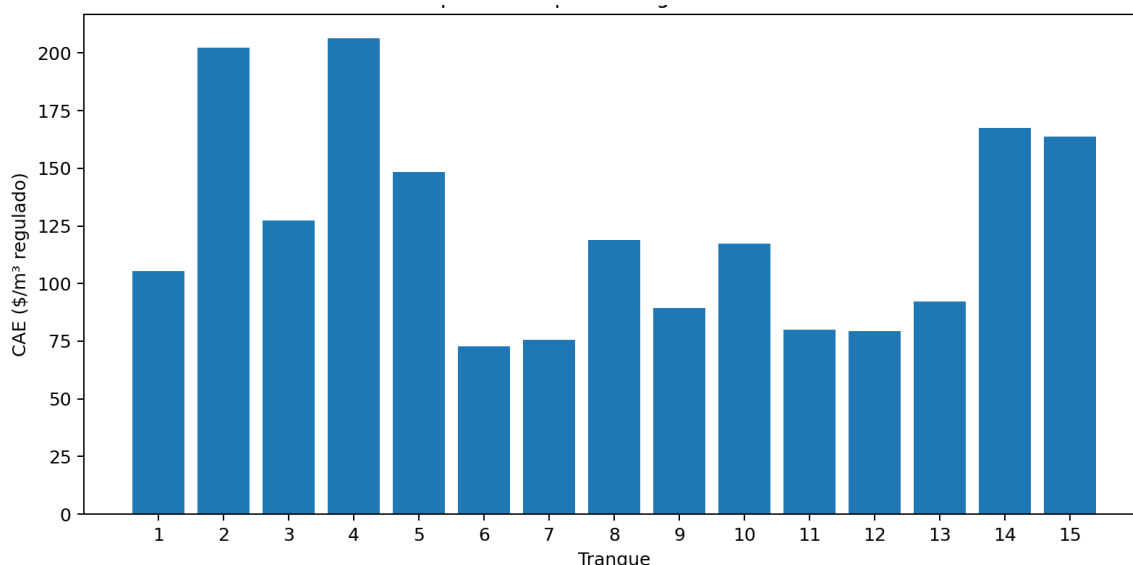
Tabla 27 Indicadores de costo por m³ en el escenario crítico.

Tranque	CAPEX social (\$/m ³ capacidad)	OPEX social (\$/m ³ regulado)	CAE (\$/m ³ regulado)	Ciclos	Clasificación
1	11.302	6,9	105	9,00	Costo medio
2	20.734	18,9	202	9,00	Costo alto
3	14.017	6,6	127	9,00	Costo medio
4	22.372	12,9	206	9,00	Costo alto
5	16.187	8,6	148	9,00	Costo medio
6	7.794	3,9	73	8,81	Costo bajo
7	8.130	4,8	76	9,00	Costo bajo
8	8.621	7,5	119	6,10	Costo medio
9	8.284	5,4	90	7,74	Costo medio
10	11.618	12,9	117	9,00	Costo medio
11	7.163	2,7	80	7,18	Costo bajo
12	8.442	5,4	79	9,00	Costo bajo
13	9.428	9,0	92	9,00	Costo medio
14	7.886	9,0	167	3,89	Costo alto
15	7.911	8,9	164	4,00	Costo alto

Fuente: elaboración propia

Como complemento de los indicadores de rentabilidad, se incorporó una medida de costo-efectividad destinada a comparar alternativas de distinta escala y capacidad de regulación. Para ello, el costo anual equivalente se relacionó con el volumen efectivamente regulado durante la temporada, evitando limitar la comparación a la capacidad geométrica de almacenamiento de un solo llenado. Este indicador permite reconocer qué alternativas utilizan de manera más eficiente los recursos de inversión y operación para generar regulación hídrica. El **Gráfico 5** presenta el costo anual equivalente por metro cúbico regulado para los tranques evaluados.

Gráfico 5 Costo anual equivalente por m³ regulado.



Fuente: elaboración propia

7.10 SENSIBILIDAD Y PUNTO DE EQUILIBRIO

La sensibilidad se evaluó reduciendo los beneficios agrícolas en 20%, aumentando el CAPEX en 20% y combinando ambos cambios. También se estimó el factor mínimo de beneficios requerido para que el VAN sea igual a cero y el margen de seguridad asociado.

$$f_{BE,i} = \frac{VP(\text{Costos}) - VP(VR)}{VP(\text{Beneficio agrícola})} \quad (7.10.1)$$

$$MS_i = 1 - f_{BE,i} \quad (7.10.2)$$

Los Tranques 2 y 4 dejan de ser rentables ante una reducción de 20% de los beneficios. Los Tranques 14 y 15 mantienen B/C superior a uno con una reducción aislada de beneficios o con un aumento aislado del CAPEX, pero caen bajo la

unidad en el choque combinado. Las demás alternativas conservan B/C superior a uno bajo ambos cambios simultáneos.

Con el fin de examinar la robustez económica de las alternativas en la **Tabla 28** se resumen los resultados de sensibilidad individual del escenario crítico.

Tabla 28 Sensibilidad individual del escenario crítico.

Tranque	B/C base	Margen seguridad	B/C beneficio - 20%	B/C CAPEX +20%	B/C combinado
1	2,21	54,9%	1,77	1,87	1,50
2	1,15	13,3%	0,92	0,98	0,79
3	1,83	45,3%	1,46	1,54	1,23
4	1,13	11,5%	0,90	0,95	0,76
5	1,57	36,4%	1,26	1,32	1,06
6	3,19	68,8%	2,56	2,69	2,16
7	3,08	67,6%	2,47	2,61	2,08
8	1,96	49,1%	1,57	1,66	1,33
9	2,60	61,7%	2,08	2,20	1,76
10	1,99	49,9%	1,59	1,70	1,36
11	2,92	65,8%	2,34	2,45	1,96
12	2,94	66,1%	2,35	2,49	1,99
13	2,53	60,5%	2,02	2,15	1,72
14	1,39	28,4%	1,12	1,18	0,94
15	1,43	29,9%	1,14	1,20	0,96

Fuente: elaboración propia

7.11 PRIORIZACIÓN INTEGRADA DE ALTERNATIVAS

La priorización combina rentabilidad, costo anual equivalente, compatibilidad del llenado y condición de impulsión. No se utiliza un único indicador, porque una alta relación B/C puede coexistir con restricciones de operación o con incertidumbres constructivas.

La siguiente **Tabla 29** integra los criterios de rentabilidad, costo, llenado y condición de impulsión para establecer una priorización preliminar de las alternativas.

Tabla 29 Priorización integrada preliminar

Prioridad	Tranque	B/C crítico	CAE (\$/m³)	Llenado crítico (días)	Interpretación
1	7	3,08	76	13,5	Prioridad alta
2	6	3,19	73	20,4	Prioridad alta
3	12	2,94	79	17,6	Prioridad alta
4	11	2,92	80	25,1	Prioridad alta
5	13	2,53	92	7,2	Prioridad alta
6	9	2,60	90	23,3	Segunda prioridad; requiere validación
7	1	2,21	105	10,9	Segunda prioridad; requiere validación
8	10	1,99	117	6,4	Segunda prioridad; requiere validación

Fuente: elaboración propia

La priorización integrada ubica en el primer grupo a los Tranques 6, 7, 12, 11 y 9. Los Tranques 2 y 4 deben mantenerse como alternativas marginales, pues presentan el mayor costo anual equivalente y baja resistencia frente a una reducción de beneficios. Los Tranques 14 y 15 requieren una revisión operacional específica debido a sus tiempos de llenado.

Para orientar el avance desde la prefactibilidad, la siguiente **Tabla 30** identifica las limitaciones pendientes y los controles requeridos para cada alternativa.

Tabla 30 Limitaciones y controles para avanzar a factibilidad.

Limitación	Control requerido
Cubicación T6–T15	Reemplazar cantidades normalizadas por superficies de proyecto y comparación en Civil 3D.
Situación sin proyecto	Completar márgenes agrícolas por cultivo para obtener beneficios estrictamente incrementales.
Disponibilidad hidráulica	Validar caudal derivable y programación conjunta con la organización de usuarios.
Geotecnia	Verificar estabilidad, aptitud de materiales, filtraciones y disponibilidad de relleno.

Limitación	Control requerido
Tuberías y bombeo	Definir DN, SDR, curvas Q-H, eficiencia, cavitación y punto real de operación.
Costos de mercado	Actualizar con cotizaciones comparables, fecha base, fletes, montaje y condiciones locales.
Predios beneficiados	Vincular cada tranque con superficie, usuarios, cultivos y tecnología de riego real.

Fuente: elaboración propia

7.12 VINCULACIÓN CON EL LIBRO EXCEL

El libro Excel editable presentado en el Anexo 5 contiene las fórmulas vinculadas desde los datos técnicos hasta los resultados finales. Las celdas de entrada se identifican en azul y fondo amarillo; las fórmulas aparecen en negro; y los vínculos entre hojas, en verde. La hoja 15_Resumen_Capitulo7 reproduce los principales resultados de este capítulo y la hoja 16_Coherencia_Cap5_6 documenta la correspondencia entre los supuestos de los capítulos metodológicos y la evaluación.

7.13 SÍNTESIS DE RESULTADOS

El modelo consolidado considera 956.282 m³ de volumen útil y obtiene un CAPEX privado de \$11.014.068.213, un CAPEX social de \$9.123.280.246 y un OPEX social anual de \$42.235.127. En el escenario crítico, el sistema individual agregado regula 6.247.572 m³/año, equivalente a 500,8 ha bajo el patrón agrícola transferido. El VAN agregado de cribado es \$11.200.283.969 y la relación B/C 2,12.

Once alternativas presentan rentabilidad robusta y cuatro rentabilidades marginales. La decisión preliminar favorece los Tranques 6, 7, 12, 11 y 9 por combinar bajo costo anual equivalente, rentabilidad y capacidad operacional. Estos resultados justifican continuar con estudios de detalle, pero no permiten recomendar la construcción simultánea de los quince tranques sin verificar la disponibilidad compartida del Canal Buzeta y completar la situación agrícola sin proyecto.

8 CONCLUSIONES

Las conclusiones se formulan a partir de la integración de los resultados territoriales, hidráulicos, geométricos, energéticos, económicos y sociales desarrollados en los capítulos anteriores. En coherencia con el alcance de prefactibilidad de la tesina, estas conclusiones no constituyen una aprobación de diseño ni una decisión de inversión definitiva, sino una respuesta fundada respecto de la aplicabilidad del modelo de acumulación lateral y de las condiciones que determinan su desempeño en el Canal Buzeta.

8.1 CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO GENERAL

El objetivo general se considera cumplido a nivel de prefactibilidad. La investigación permitió evaluar la aplicabilidad de un modelo de acumulación lateral en el Canal Buzeta bajo condiciones de escasez y prorrata, identificando quince alternativas, estimando su capacidad de almacenamiento, analizando sus condiciones de llenado y restitución, determinando requerimientos de impulsión y comparando su desempeño económico-social. La evidencia obtenida indica que la acumulación lateral puede constituir una medida técnicamente aplicable para introducir regulación intermedia y mejorar la oportunidad de uso del agua; sin embargo, su viabilidad es selectiva y depende de la disponibilidad real del caudal, del número de ciclos de llenado, de la conexión hidráulica, de la topografía, de la geotecnia, de la organización de los turnos y de la superficie agrícola efectivamente beneficiada.

La solución analizada no aumenta la oferta hídrica de la cuenca ni modifica los derechos de aprovechamiento. Su aporte consiste en desplazar temporalmente el agua disponible, almacenar caudales durante ventanas de menor demanda o disponibilidad operacional y entregarlos en momentos en que su utilidad para el riego es mayor. Por ello, la mejora esperada corresponde principalmente a la disponibilidad efectiva y a la flexibilidad de distribución, y no a una generación adicional del recurso.

8.2 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La **Tabla 31** resume el grado de cumplimiento de los doce objetivos específicos. Se distingue entre objetivos cumplidos, cumplidos a nivel de prefactibilidad y cumplidos parcialmente cuando la información disponible no permite cerrar una verificación definitiva.

Tabla 31 Cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo	Resultado alcanzado	Grado de cumplimiento	Observación principal
1	Se sistematizaron antecedentes técnicos y experiencias sobre regulación, almacenamiento y operación de canales.	Cumplido	El estado del arte entrega la base conceptual del modelo.
2	Se integraron SIG, Civil 3D, HEC-RAS, análisis hidráulico, evaluación económica y gestión del agua.	Cumplido	Se aplicaron herramientas asociadas a distintas asignaturas del magíster.
3	Se caracterizó el Canal Buzeta, su extensión, sectores, caudales de referencia, prorrata, turnos y restricciones.	Cumplido	La caracterización permite explicar el problema de distribución.
4	Se definieron criterios técnicos, hidráulicos, operacionales y normativos para obras menores y laterales.	Cumplido	El análisis se acotó a obras menores de 7 m y 150.000 m ³ .
5	Se consolidó una base integrada con coordenadas, sectores HEC-RAS, volúmenes, caudales y condición de impulsión.	Cumplido	La base admite actualización y trazabilidad entre herramientas.
6	Se aplicó un filtro territorial, volumétrico y técnico a los sitios identificados.	Cumplido a nivel de prefactibilidad	La condición predial, ambiental y geotécnica requiere verificación de detalle.
7	Se estableció un flujo de modelación con QGIS, Civil 3D, HEC-RAS, simulación fotovoltaica y Excel.	Cumplido	El procedimiento es replicable en otros canales.

Objetivo	Resultado alcanzado	Grado de cumplimiento	Observación principal
8	Se aplicaron las herramientas a escenarios de prorrata, llenado, ciclos y operación de los tranques.	Cumplido a nivel de prefactibilidad	La operación simultánea de varias alternativas aún requiere programación conjunta.
9	Se determinaron quince alternativas con volumen, sector, caudal de referencia y condición de conexión.	Cumplido a nivel de prefactibilidad	Diez cubicaciones civiles permanecen normalizadas y deben reemplazarse por cubicaciones directas.
10	Se compararon escenarios sin regulación local y con acumulación mediante volumen regulado, ciclos y beneficios.	Cumplido parcialmente	Falta una simulación dinámica completa de turnos reales y la situación agrícola sin proyecto.
11	Se evaluó la aplicabilidad técnica, operacional y económica; se identificaron riesgos y condiciones mínimas.	Cumplido a nivel de prefactibilidad	La evaluación ambiental, normativa y predial debe profundizarse.
12	Se formularon recomendaciones profesionales, de aplicación, personales y por escenarios temporales.	Cumplido	El Capítulo 9 establece una ruta gradual de implementación.

Fuente: elaboración propia

8.3 CONCLUSIONES TÉCNICAS E HIDRÁULICAS

La evaluación territorial y geométrica confirmó que existen emplazamientos laterales con capacidad suficiente para incorporar regulación distribuida en distintos tramos del canal. El conjunto de las quince alternativas alcanza una capacidad útil aproximada de 956.282 m³, lo que demuestra que el territorio dispone de oportunidades físicas relevantes. No obstante, la capacidad geométrica por sí sola no determina la conveniencia de una alternativa: el desempeño depende de la relación entre volumen, caudal disponible, tiempo de llenado, número de ciclos, pérdidas, conducción y energía requerida.

El análisis operacional mostró que, bajo una prorrata crítica, las alternativas ubicadas en los sectores de menor caudal o con mayor volumen no necesariamente completan los ciclos programados. Los Tranques 14 y 15 presentan los mayores tiempos de llenado y, por tanto, una menor utilización anual de su capacidad. Este resultado confirma que el volumen estático debe evaluarse junto con el volumen regulado durante la temporada, pues una obra de gran capacidad puede presentar un desempeño limitado si el caudal derivable no permite llenarla con la frecuencia requerida.

La relación altimétrica entre canal, vaso y punto de entrega es otra condición determinante. Catorce alternativas requieren elevación mecánica en el llenado, la restitución o ambos procesos, mientras que el Tranque 11 mantiene una condición gravitacional en el escenario base. Esto demuestra que la energía y la configuración de las conducciones forman parte central del modelo y no pueden considerarse partidas secundarias.

8.4 CONCLUSIONES OPERACIONALES Y DE GESTIÓN DEL AGUA

La acumulación lateral introduce flexibilidad en un sistema actualmente condicionado por turnos rígidos y prorrata. Su principal beneficio potencial es desacoplar parcialmente el momento de captación del momento de uso, permitiendo transformar un caudal discontinuo en una entrega predial más concentrada y oportuna. Sin embargo, la infraestructura no reemplaza la gestión: cada tranque requiere reglas de llenado, prioridades de uso, medición volumétrica, coordinación entre usuarios y control de las captaciones para evitar que varias obras utilicen simultáneamente un mismo caudal de referencia.

La suma de los beneficios individuales no representa automáticamente el beneficio de una cartera de quince obras. Varias alternativas comparten tramos del canal y, en consecuencia, compiten por el mismo recurso. La aplicabilidad a escala de sistema exige una programación hidráulica conjunta que determine qué tranque se llena, en qué momento, con qué caudal y para qué usuarios. Esta condición constituye uno de los principales límites del resultado agregado y una conclusión central desde la perspectiva de gestión del agua.

8.5 CONCLUSIONES ENERGÉTICAS Y CONSTRUCTIVAS

El bombeo fotovoltaico directo, sin baterías, resulta coherente con el carácter estacional de la demanda y con la función del tranque como almacenamiento hidráulico. Esta configuración evita costos y reposiciones de acumuladores electroquímicos, pero requiere que la potencia instalada, la altura manométrica, el diámetro interior de las tuberías y las curvas de las bombas sean verificados de manera conjunta. El costo operacional fotovoltaico estimado es moderado respecto de la inversión, aunque su importancia aumenta en las alternativas con mayor potencia y altura de elevación.

Desde el punto de vista constructivo, los resultados de los Tranques 1 a 5 cuentan con una base de cubicación más sólida, mientras que los Tranques 6 a 15 mantienen cantidades de excavación, relleno y geomembrana normalizadas a partir de totales consolidados. En consecuencia, el orden económico actual puede variar cuando se disponga de topografía de detalle, análisis geotécnico y balance real de materiales.

8.6 CONCLUSIONES ECONÓMICAS Y SOCIALES

La evaluación formulada a treinta años entrega indicadores favorables para la mayoría de las alternativas en los escenarios analizados. En el escenario crítico, once tranques presentan una relación beneficio/costo robusta y cuatro se ubican en condición marginal. Los Tranques 6, 7, 12, 11 y 9 combinan menores costos anuales equivalentes por metro cúbico, mejor relación beneficio/costo y una condición operacional comparativamente favorable. En cambio, los Tranques 2 y 4 son sensibles a una reducción de beneficios, y los Tranques 14 y 15 se vuelven vulnerables cuando se combina una disminución de beneficios con un aumento de inversión.

Los indicadores económicos no deben interpretarse como rentabilidad definitiva. El patrón de cultivos fue transferido desde un estudio representativo y los márgenes de la situación sin proyecto permanecen pendientes de validación. Mientras esos valores no se completen, el beneficio calculado constituye una aproximación superior. La conclusión económica correcta es, por tanto, que existen alternativas que justifican avanzar a factibilidad, no que se encuentre demostrada la conveniencia de construir todas las obras.

El costo por metro cúbico regulado resultó más informativo que el costo por metro cúbico de capacidad. Este indicador incorpora la frecuencia de llenado y permite reconocer que una obra de bajo costo geométrico puede resultar operacionalmente cara cuando completa pocos ciclos. La evaluación económica debe mantener esta distinción en las siguientes etapas.

8.7 CONCLUSIONES NORMATIVAS, AMBIENTALES Y TERRITORIALES

El enfoque de obras laterales, fuera de cauce natural y de menor escala reduce la complejidad relativa frente a grandes embalses, pero no elimina las exigencias regulatorias. La factibilidad final depende de la propiedad del terreno, de las servidumbres, de la compatibilidad con la infraestructura existente, de la seguridad de los muros, del manejo de excedentes, de la eventual intervención de quebradas y de los permisos sectoriales que correspondan. En consecuencia, el filtro técnico-normativo aplicado es válido como preselección, pero debe complementarse con una revisión jurídica y ambiental específica por emplazamiento.

8.8 APOORTE ORIGINAL Y RESPUESTA AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El principal aporte de la tesina consistió en integrar, en una misma secuencia de evaluación, la operación real de un canal sometido a prorrata, la identificación territorial de emplazamientos, la cubicación de vasos, la conexión hidráulica, el bombeo fotovoltaico, los costos privados y sociales y la comparación de escenarios. Esta integración transforma una idea territorial en un procedimiento técnico reproducible y constituye un aporte aplicable a otros canales de la Región de Coquimbo con baja capacidad de regulación intermedia.

La problemática planteada recibe una respuesta condicionada: la acumulación lateral sí puede mejorar la disponibilidad efectiva y la oportunidad de entrega del agua en el Canal Buzeta, pero solo cuando el sitio presenta una combinación favorable de capacidad, caudal de llenado, número de ciclos, costo unitario, conexión hidráulica y usuarios beneficiados. La solución no es uniforme para todo el canal y debe implementarse de manera selectiva, gradual y coordinada.

8.9 CONCLUSIÓN PROFESIONAL Y VALÓRICA

Desde la perspectiva de la gestión del agua, la investigación confirma que los problemas de distribución no se resuelven únicamente mediante infraestructura ni exclusivamente mediante reglas de operación. Las soluciones efectivas requieren combinar ingeniería hidráulica, información territorial, evaluación económica, gobernanza y participación de los usuarios. La responsabilidad profesional exige presentar los beneficios potenciales junto con sus incertidumbres, evitar prometer volúmenes que el sistema no puede entregar y priorizar alternativas que mejoren la equidad y la resiliencia sin trasladar costos o riesgos injustificados a otros usuarios del canal.

9 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones se organizan en cuatro perspectivas: profesionales, de aplicación, personales y por escenarios temporales. Su propósito es orientar la continuidad del estudio y establecer una ruta de decisión que permita pasar desde la prefactibilidad a una eventual implementación sin perder la trazabilidad técnica ni la coordinación con los usuarios del Canal Buzeta.

9.1 RECOMENDACIONES PROFESIONALES

- Mantener una estructura de trazabilidad única entre coordenadas, numeración de tranques, estación HEC-RAS, volumen útil, caudal de sector, cotas, condición de impulsión, presupuesto y evaluación social. Todo cambio en un dato de origen debe propagarse al modelo económico.
- Separar claramente los datos medidos, los datos calculados y los supuestos. Las celdas editables, las fórmulas y los vínculos deben permanecer identificados para evitar que un total digitado sustituya el procedimiento de cálculo.
- No seleccionar alternativas únicamente por volumen o por relación beneficio/costo. La decisión profesional debe combinar capacidad, tiempo de llenado, número de ciclos, costo anual equivalente, confiabilidad del suministro, complejidad constructiva y usuarios beneficiados.
- Aplicar un enfoque multidisciplinario. La topografía, la hidráulica, la geotecnia, la electricidad, la agronomía, la evaluación social y la normativa deben revisarse de forma integrada y no como estudios independientes.
- Comunicar la incertidumbre de manera explícita. Los resultados actuales son adecuados para priorizar estudios, pero no para aprobar la construcción de las quince alternativas ni para comprometer beneficios agrícolas definitivos.
- Conservar una versión controlada de los archivos Civil 3D, HEC-RAS, SIG y Excel, con fecha, fuente y responsable, de modo que la evaluación pueda ser auditada y actualizada.

9.2 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN TÉCNICA

Antes de avanzar a diseño, cada alternativa priorizada debe superar una etapa de validación técnica mínima. La **Tabla 32** resume los antecedentes requeridos y la decisión que permiten adoptar.

Tabla 32 Antecedentes mínimos para avanzar desde prefactibilidad

Antecedente requerido	Trabajo mínimo	Producto	Decisión asociada
Topografía de detalle	Levantamiento del vaso, muro, canal, conducciones y área de descarga.	Superficies y perfiles definitivos.	Confirmar volumen, altura, movimiento de tierras y HMT.
Geotecnia	Calicatas, sondajes, clasificación, permeabilidad y estabilidad.	Modelo geotécnico y balance de materiales.	Definir taludes, fundación, drenaje y aptitud del relleno.
Hidráulica	Perfil longitudinal, DN, SDR, accesorios, pérdidas y curvas Q-H.	Diseño de entrada, salida y restitución.	Validar caudal, potencia, cavitación y operación.
Disponibilidad y turnos	Registro histórico de prorrata, turnos, caudales y captaciones.	Regla operacional por sector.	Determinar ciclos reales y evitar doble conteo.
Agronomía y usuarios	Catastro predial, superficie, cultivos, demanda, márgenes y tecnología de riego.	Situación con y sin proyecto.	Calcular beneficio incremental real.
Predial y normativa	Dominio, servidumbres, cauces, permisos y compatibilidad territorial.	Matriz de restricciones por sitio.	Descartar o habilitar emplazamientos.
Costos	APU, fletes, montaje, cotizaciones y fecha base.	Presupuesto actualizado.	Recalcular CAPEX, OPEX, VAN y B/C.
Seguridad	Revanca, evacuación, rebalse, cierre, instrumentación y plan de emergencia.	Criterios de seguridad y operación.	Reducir riesgo para personas e infraestructura.

Fuente: elaboración propia.

La programación conjunta del canal debe modelarse antes de definir una cartera de obras. Se recomienda construir un balance por tramo y por turno que

limite la suma de captaciones, establezca prioridades de llenado y considere el tiempo de tránsito del agua. La incorporación de medidores, telemetría y registros de nivel permitiría comparar el volumen autorizado, el volumen efectivamente captado y el volumen entregado.

El sistema fotovoltaico debe diseñarse con series horarias del emplazamiento, curvas de bomba y diámetro interior real. Debe mantenerse el bombeo directo sin baterías como alternativa base, evaluando conexión a red o respaldo híbrido únicamente cuando la continuidad requerida no pueda cumplirse con la ventana solar.

9.3 RECOMENDACIONES DE PRIORIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

Se recomienda aplicar un proceso de decisión por etapas y no formular inicialmente las quince obras. El primer grupo de profundización debiera considerar los Tranques 6, 7, 12, 11 y 9, porque presentan la mejor combinación preliminar entre relación beneficio/costo, costo anual equivalente y desempeño operacional. La inclusión del Tranque 11 es especialmente relevante como caso de comparación gravitacional, al permitir evaluar el efecto de eliminar el CAPEX y OPEX de bombeo.

Los Tranques 2 y 4 no deben descartarse definitivamente, pero su evaluación debe mantenerse como segunda prioridad debido a su sensibilidad económica. Los Tranques 14 y 15 requieren revisar el tamaño del vaso, la estrategia de llenado o una operación parcial, porque la baja disponibilidad aguas abajo limita los ciclos y eleva el costo por metro cúbico regulado.

La siguiente **Tabla 33** presenta la priorización preliminar de las alternativas que se recomienda profundizar en etapas posteriores de estudio.

Tabla 33 Priorización preliminar para profundizar estudios

Grupo	Alternativas	Acción recomendada
Grupo 1	6, 7, 12, 11 y 9	Desarrollar prefactibilidad avanzada y comparar alternativas de diseño.
Grupo 2	1, 3, 5, 8, 10 y 13	Mantener como cartera de respaldo y validar costos individuales.
Grupo 3	2 y 4	Reformular geometría o justificar beneficios superiores antes de avanzar.
Grupo 4	14 y 15	Revisar volumen, llenado parcial y programación por baja disponibilidad aguas abajo.

Fuente: elaboración propia

9.4 RECOMENDACIONES INSTITUCIONALES Y DE GESTIÓN

- Constituir una mesa técnica con la organización de usuarios, representantes de sectores, propietarios de los terrenos y organismos públicos competentes antes de definir el emplazamiento definitivo.
- Formalizar un protocolo de operación que establezca quién autoriza el llenado, cómo se asigna el volumen acumulado, quién financia la operación y cómo se resuelven diferencias entre usuarios.
- Incorporar medición volumétrica en la entrada y salida de cada obra y mantener registros auditables. La regulación distribuida requiere transparencia para no afectar la confianza en el reparto.
- Evaluar modelos de propiedad y administración diferenciados: obra comunitaria de la organización, obra sectorial, asociación de usuarios o infraestructura intrapredial vinculada a reglas colectivas.
- Integrar la acumulación lateral con medidas de reducción de pérdidas, revestimiento selectivo, telemetría, mantención de compuertas y mejora de la programación. La obra no debe reemplazar intervenciones más costo-efectivas en el canal.
- Aplicar criterios de equidad territorial, evitando concentrar la regulación únicamente en sectores con mayor capacidad de inversión o mayor cercanía institucional.

9.5 RECOMENDACIONES ECONÓMICAS Y FINANCIERAS

La evaluación económica debe actualizarse mediante un presupuesto por alternativa y una situación agrícola sin proyecto debidamente validada. Se recomienda mantener el costo anual equivalente por metro cúbico regulado como indicador principal de comparación y utilizar el VAN y la relación beneficio/costo como criterios complementarios.

- Aplicar un esquema de inversión por compuertas de decisión: estudio, prefactibilidad avanzada, diseño, piloto, evaluación y escalamiento.
- Actualizar precios unitarios y factores sociales a la fecha efectiva de postulación o inversión, manteniendo separados impuestos, mano de obra, divisa, equipos y materiales.

- Incorporar reposición de inversores, bombas, variadores, instrumentación y rehabilitación de geomembrana, además de costos de vigilancia, limpieza y administración.
- Evaluar el costo de oportunidad del agua y la posibilidad de que el volumen almacenado sustituya pérdidas o mejor oportunidad, en lugar de asumir automáticamente nueva superficie regada.
- No utilizar el B/C agregado de las quince alternativas para justificar una cartera completa; cada proyecto y cada combinación de proyectos debe evaluarse con el caudal compartido disponible.

9.6 RECOMENDACIONES POR ESCENARIO TEMPORAL

La continuidad del proyecto debe organizarse en horizontes temporales, de manera que la inversión aumente solo cuando la incertidumbre haya disminuido.

Para secuenciar la continuidad del proyecto de acuerdo con la reducción progresiva de incertidumbre, la siguiente **Tabla 34** presenta la ruta temporal de implementación.

Tabla 34 Ruta temporal de implementación

Horizonte	Objetivo	Acciones principales	Actores	Resultado esperado
Corto plazo 0-12 meses	Reducir incertidumbre y seleccionar pilotos.	Topografía, geotecnia, catastro predial, turnos reales, márgenes agrícolas y cubicación directa de alternativas prioritarias.	OUA, propietarios, equipo técnico, organismos públicos.	Selección de uno o dos sitios para diseño de detalle.
Mediano plazo 1-3 años	Validar el modelo en terreno.	Diseñar y ejecutar un piloto, instalar medición y telemetría, operar dos temporadas y evaluar costos, ciclos, pérdidas y aceptación de usuarios.	OUA, beneficiarios, consultores, financistas y fiscalizadores.	Evidencia operacional y económica para decidir escalamiento.
Largo plazo 3-10 años	Desarrollar regulación distribuida coordinada.	Escalar por sectores, integrar automatización, reducción de pérdidas y programación de turnos, con evaluación periódica.	OUA, instituciones regionales y usuarios.	Red de acumulación selectiva, adaptable y gestionada como sistema.

Fuente: elaboración propia.

9.7 RECOMENDACIONES PERSONALES Y ÉTICAS

Una investigación aplicada en gestión del agua exige rigor técnico, apertura al aprendizaje y capacidad de trabajo con actores que poseen intereses distintos. Se recomienda mantener una actitud crítica frente a los propios resultados, documentar los errores y cambios metodológicos, y solicitar revisión especializada cuando una decisión exceda el ámbito de competencia profesional.

La relación con los usuarios debe basarse en transparencia y respeto. Es necesario explicar que una obra de acumulación no crea agua adicional, que puede modificar la oportunidad del reparto y que sus beneficios dependen de reglas colectivas. La ética profesional obliga a no sobreestimar beneficios, no minimizar riesgos de seguridad y no utilizar resultados preliminares para comprometer inversiones o expectativas sin respaldo.

También se recomienda cultivar perseverancia, orden documental y disposición al trabajo interdisciplinario. La calidad de este tipo de estudios depende tanto del dominio de las herramientas como de la capacidad de escuchar a regantes, operadores, especialistas y autoridades, integrando su conocimiento práctico con la evidencia técnica.

9.8 RECOMENDACIÓN FINAL

Se recomienda continuar el desarrollo del modelo de acumulación lateral mediante una prefactibilidad avanzada sobre un grupo reducido de alternativas y ejecutar posteriormente un piloto instrumentado. No se recomienda avanzar de manera simultánea con los quince tranques ni adoptar los indicadores económicos actuales como rentabilidad definitiva. La decisión debe condicionarse a la verificación del caudal compartido, de la situación agrícola sin proyecto, de la propiedad y permisos, de la geotecnia y de los costos individuales.

La adopción gradual, con medición y evaluación posterior, permitirá determinar si la acumulación lateral puede transformarse en una medida replicable de adaptación para el Canal Buzeta y otros sistemas de riego de la Región de Coquimbo. Su valor no radica en construir el mayor número de obras, sino en seleccionar aquellas que aporten regulación verificable, equidad operacional y beneficios superiores a sus costos y riesgos.

10 Referencias bibliográficas

- A review on hydrological models. (2024). [Material de lectura de MWM110, Evaluación de los recursos]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Autodesk, Inc. (2024). Autodesk Civil 3D 2024 [Software]. <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview>
- Barros, R., Isidoro, D., & Aragüés, R. (2011). Long-term water balances in La Violada irrigation district (Spain): I. Sequential assessment and minimization of closing errors. *Agricultural Water Management*, 102(1), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.004>
- Brauman, K. A. (2015). Hydrologic ecosystem services: Linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *WIREs Water*, 2(4), 345–358. <https://doi.org/10.1002/wat2.1081>
- Carvallo, [inicial no informada]. (2024). Gestión de calidad y mejora continua [Material complementario de la Asignatura 130]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Causapé, J., Quílez, D., & Aragüés, R. (2004a). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: I. Irrigation quality. *Agricultural Water Management*, 70(3), 195–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(04\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(04)00177-5)
- Causapé, J., Quílez, D., & Aragüés, R. (2004b). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management*, 70(3), 211–228. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.006>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). La megasequía 2010–2015: Una lección para el futuro [Informe a la Nación]. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Comisión Nacional de Riego. (2018). Mejoramiento canales Bellavista, Villalón y Buzeta [Informe técnico].
- Comisión Nacional de Riego. (s. f.). Documento Técnico N.º 18 (DT-18): Precios unitarios de obras de riego [Documento técnico; versión actualizada utilizada en la tesina]. <https://www.cnr.gob.cl/agricultores/concursos-de-riego-y-drenaje/manuales/>
- Fan, Y., Chen, H., Gao, Z., Fan, Y., Chang, X., Yang, M., & Fang, B. (2023). Water distribution and scheduling model of an irrigation canal system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107866. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107866>
- Flores, R. (2024a). Modelación hidrológica y evaluación de recursos mediante modelos numéricos [Material de clase de MWM110, Clase 3]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.

- Flores, R. (2024b). Incertidumbre, análisis de sensibilidad y evaluación de escenarios en modelación hidrológica [Material de clase de MWM110, Clase 4]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Google. (s. f.). Google Earth Pro [Software]. Recuperado el 13 de julio de 2026. <https://www.google.com/earth/about/versions/>
- Ishikawa, K. (1985). What is total quality control? The Japanese way. Prentice-Hall.
- Junta de Vigilancia del Río Choapa. (2026). Registro histórico de prorratas 2020–2025 [Base de datos no publicada].
- Juran, J. M. (1986). The quality trilogy: A universal approach to managing for quality. *Quality Progress*, 19(8), 19–24.
- Liao, X., Mahmoud, A., Hu, T., & Wang, J. (2022). A novel irrigation canal scheduling model adaptable to the spatial-temporal variability of water conveyance loss. *Agricultural Water Management*, 274, 107961. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107961>
- Martín-Vide, J. (2024a). Why plan – System planning – Water resources [Material de clase de MWM100, Clase 1]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Martín-Vide, J. (2024b). Water governance in Chile: Availability, management and climate change [Material de clase de MWM100, Clase 2]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Microsoft Corporation. (2026). Microsoft Excel [Software]. <https://www.microsoft.com/microsoft-365/excel>
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2026). Precios sociales 2026. Sistema Nacional de Inversiones. <https://sni.gob.cl/wp-content/uploads/Precios-Sociales-2026.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Social. (2014). Metodología para la formulación y evaluación de proyectos de embalses y obras hidráulicas multipropósito. Sistema Nacional de Inversiones. <https://sni.gob.cl/wp-content/uploads/Metodologia-Embalses-Multiproposito-2014.pdf>
- Ministerio de Energía. (s. f.). Explorador Solar [Herramienta web]. Recuperado el 13 de julio de 2026. <https://solar.minenergia.cl/>
- Chile. Ministerio de Justicia. (1981). Decreto con Fuerza de Ley N.º 1.122: Fija texto del Código de Aguas. Diario Oficial de la República de Chile.
- PVsyst SA. (2026). PVsyst [Software de simulación fotovoltaica]. <https://www.pvsyst.com/>
- QGIS Development Team. (2026). QGIS Geographic Information System [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/>
- Six Sigma process control. (2024). [Material de lectura de la Asignatura 130, Gestión de calidad y mejora de procesos]. Universidad Técnica Federico Santa María.

- Statistical process control. (2024). [Material de lectura de la Asignatura 130, Gestión de calidad y mejora de procesos]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Suárez, R. (2024). Observación de la Tierra y percepción remota aplicada a recursos hídricos [Material de clase de MWM110, Clase 1]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Torres-Bejarano, F. M., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. D. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Trujillo, R. (2024). Modelos digitales de elevación, análisis espacial e índices espectrales aplicados a la evaluación de recursos hídricos [Material de clase de MWM110, Clase 2]. Magíster en Water Management, Universidad Técnica Federico Santa María.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2026). HEC-RAS: River Analysis System [Software]. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- van Vliet, M., & Kok, K. (2015). Combining backcasting and exploratory scenarios to develop robust water strategies in face of uncertain futures. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(1), 43–74. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9479-6>
- Vos, J., & Vincent, L. (2011). Volumetric water control in a large-scale open canal irrigation system with many smallholders: The case of Chancay-Lambayeque in Peru. *Agricultural Water Management*, 98(4), 705–714. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.008>
- Water governance in Chile: Availability, management and climate change. (2024). [Material de lectura de MWM100]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Why plan? System planning and water resources management. (2024). [Material de lectura de MWM100]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ye, X., Xu, X., Ji, Y., Liu, L., Lian, H., Liu, W., & Li, M. (2026). Hydrodynamic simulation and multi-objective optimization coupling for efficient decision-making of water transport and distribution in irrigated areas. *Agricultural Water Management*, 323, 110055. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110055>
- Zhang, F., He, C., Fan, Y., Hao, X., & Kang, S. (2022). Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand. *Agricultural Water Management*, 260, 107245. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107245>
- Zhou, K., Gao, Z., Fan, Y., Chen, H., Zheng, X., & Zhang, X. (2025). Research on the coupled model of canal system optimization control and water distribution. *Agricultural Water Management*, 320, 109842. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.10984>

11 Listado de acrónimos, siglas y abreviaturas

Sigla o abreviatura	Significado
APU	Análisis de precios unitarios.
B/C	Relación beneficio/costo.
CAE	Costo anual equivalente.
CAPEX	Capital expenditure; inversión inicial o costo de capital del proyecto.
CLP	Peso chileno.
CNR	Comisión Nacional de Riego.
CR2	Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia.
DEM	Digital elevation model; modelo digital de elevación.
DHC	Archivo horario de recurso meteorológico y fotovoltaico utilizado en la simulación. La expansión de la sigla debe conservar la definida por la plataforma de origen.
DN	Diámetro nominal de una tubería.
DPHM	Planilla horaria meteorológica empleada en el análisis fotovoltaico. La expansión de la sigla debe verificarse en el archivo fuente.
DT-18	Documento Técnico N.º 18 de la Comisión Nacional de Riego.
FV	Fotovoltaico o fotovoltaica.
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System.
HDPE	High-density polyethylene; polietileno de alta densidad.
HMT	Altura manométrica total.
HSE	Horas solares equivalentes.
IVA	Impuesto al valor agregado.
JV	Junta de Vigilancia.
KMZ	Keyhole Markup Language Zipped; archivo geoespacial comprimido.
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis; análisis de decisión multicriterio.
MDSF	Ministerio de Desarrollo Social y Familia.
MMCLP	Millones de pesos chilenos.
MWM	Water Management; denominación del programa de Magíster en Gestión del Agua.
NDWI	Normalized Difference Water Index; índice normalizado diferencial de agua.
O&M	Operación y mantención.
OPEX	Operating expenditure; costos de operación y mantenimiento.
OUA	Organización de Usuarios de Aguas.
PK	Progresiva o kilometraje de referencia a lo largo del canal.
PVsyst	Software para diseño y simulación de sistemas fotovoltaicos.
QGIS	Sistema de información geográfica de código abierto.
SDR	Standard Dimension Ratio; relación entre diámetro exterior y espesor de pared de una tubería.

Sigla o abreviatura	Significado
SIG	Sistema de información geográfica.
SNI	Sistema Nacional de Inversiones.
TIR	Tasa interna de retorno.
UTM	Universal Transverse Mercator; sistema de coordenadas cartográficas.
VAN	Valor actual neto.
VANS	Valor actual neto social.
VFD	Variable-frequency drive; variador de frecuencia.

12 ANEXOS

- 12.1 Anexo 1. Fichas de clases del Magíster aplicadas a la investigación**
- 12.2 Anexo 2. Fichas de lecturas complementarias aplicadas a la investigación**
- 12.3 Anexo 3. Certificado de prorratas del río Choapa, periodo 2020–2025**
- 12.4 Anexo 4. Extracto del DT-18: precios unitarios utilizados en la evaluación**
- 12.5 Anexo 5. Modelo técnico, hidráulico, fotovoltaico y económico de los 15 tranques**
- 12.6 Anexo 6. Informes y registros del Explorador Solar a los tres sectores.**

ANEXO 1

Nº	Asignatura	Clase	Profesor	Autor(es) / Año	Título	Tipo de lectura	Metodología	Relación con la tesina	Aporte principal	Relevancia
1	MWM110	Suarez	R. Suarez	Suarez (2024)	Observación de la Tierra y percepción remota aplicada a recursos hídricos	Material de clase	Percepción remota, SIG, DEM	Permite evaluar disponibilidad hídrica mediante información espacial	Base para análisis territorial y evaluación de recursos	Alta
2	MWM110	Trujillo	R. Trujillo	Trujillo (2024)	Modelos digitales de elevación y análisis espacial	Material de clase	DEM, SIG, análisis espacial	Permite delimitar cuencas y analizar disponibilidad	Base para estudios de cuenca	Alta
3	MWM110	Flores (1)	R. Flores	Flores (2024)	Modelación hidrológica para evaluación de recursos	Material de clase	Modelación hidrológica, calibración	Permite simular disponibilidad hídrica	Base para análisis de caudales	Alta
4	MWM110	Flores (2)	R. Flores	Flores (2024)	Incertidumbre y sensibilidad en modelos hidrológicos	Material de clase	Sensibilidad, incertidumbre	Permite evaluar confiabilidad de resultados	Fundamental para análisis bajo escasez	Alta
5	MWM110	Lectura básica	—	Review on Hydrological Models (s/a)	A Review on Hydrological Models	Lectura básica	Modelación hidrológica	Base para evaluar disponibilidad hídrica	Marco conceptual de modelos	Alta
6	MWM110	Lectura básica	—	Global sensitivity analysis (s/a)	Global sensitivity analysis in hydrological modeling	Lectura básica	Análisis de sensibilidad	Permite evaluar incertidumbre en disponibilidad	Mejora confiabilidad de modelos	Alta
7	MWM110	Lectura apoyo	—	Satellite Remote Sensing (s/a)	Satellite Remote Sensing for Water Resources	Lectura de apoyo	Percepción remota, SIG	Permite evaluar recursos a escala de cuenca	Apoyo para análisis espacial	Media
8	MWM110	Lectura apoyo	—	Hydrological drought (s/a)	Intensification of hydrological drought	Lectura de apoyo	Análisis hidrológico	Relaciona gestión con escasez hídrica	Apoyo para análisis de prorrata	Alta
9	MWM100	Martin-Vide	J. Martin-Vide	Martin-Vide (2024)	Planificación de recursos hídricos	Material de clase	Planificación de sistemas	Permite analizar gestión bajo escasez	Marco conceptual de planificación	Alta
10	MWM100	Martin-Vide	J. Martin-Vide	Martin-Vide (2024)	Gobernanza del agua en Chile	Material de clase	Análisis institucional	Permite analizar distribución y prorrata	Base para gestión del recurso	Alta
11	MWM100	Martin-Vide	J. Martin-Vide	Martin-Vide (2024)	Cambio climático y recursos hídricos	Material de clase	Análisis climático	Justifica disminución de disponibilidad	Base para escenarios futuros	Alta

12	MWM100	Martin-Vide	J. Martin-Vide	Martin-Vide (2024)	Planificación hidrológica y gestión de cuencas	Material de clase	Planificación por cuencas	Permite evaluar oferta y demanda	Base para análisis de regulación	Alta
13	MWM100	Lectura básica	—	Why Plan (s/a)	Why Plan – Water resources planning	Lectura básica	Planificación hídrica	Justifica necesidad de planificación	Marco conceptual de gestión	Alta
14	MWM100	Lectura básica	—	Water governance Chile (s/a)	Water governance in Chile	Lectura básica	Análisis institucional	Relaciona gestión con escasez	Base teórica para prorata	Alta
15	MWM100	Lectura básica	—	Climate change water (s/a)	Adapting to climate change impacts on water resources	Lectura básica	Escenarios climáticos	Justifica escasez futura	Base para planificación adaptativa	Alta
16	MWM100	Lectura apoyo	—	CR2 (2023)	Informe seguridad hídrica en Chile	Lectura de apoyo	Análisis hidrológico	Justifica déficit hídrico	Contexto nacional	Alta
17	MWM100	Lectura apoyo	—	Aconcagua study (s/a)	Variabilidad climática y caudales	Lectura de apoyo	Análisis de caudales	Relaciona escasez con clima	Base para análisis de disponibilidad	Alta
18	MWM100	Lectura apoyo	—	Backcasting (2013)	Backcasting water strategies	Lectura de apoyo	Escenarios, planificación	Permite evaluar alternativas	Base para análisis de soluciones	Media
19	MWM130	Clase	Carvallo	C. Carvallo (2024)	Gestión de calidad y mejora continua	Material de clase	TQM, mejora continua	Permite optimizar procesos hidráulicos	Base metodológica para análisis de eficiencia	Alta
20	MWM130	Clase	Carvallo	C. Carvallo (2024)	Herramientas de calidad aplicadas	Material de clase	Herramientas de calidad	Permite analizar desempeño de sistemas	Base para control de procesos	Alta
21	MWM130	Lectura básica	—	Juran (1986)	Trilogía de la calidad	Lectura básica	Gestión de calidad	Permite mejorar gestión de sistemas	Base conceptual de mejora continua	Alta
22	MWM130	Lectura básica	—	Ishikawa (s/a)	Basic Quality Tools	Lectura básica	Herramientas de calidad	Permite analizar fallas y causas	Base para diagnóstico	Alta
23	MWM130	Lectura básica	—	SPC (s/a)	Statistical Process Control	Lectura básica	Control estadístico	Permite controlar variabilidad de desempeño	Base para evaluación de desempeño	Alta
24	MWM130	Lectura básica	—	Six Sigma (s/a)	Six Sigma process control	Lectura básica	DMAIC, Six Sigma	Permite optimizar procesos	Base para eficiencia hidráulica	Alta
25	MWM130	Lectura apoyo	—	Kaizen (s/a)	Kaizen improvement	Lectura de apoyo	Mejora continua	Permite optimizar operación	Base para eficiencia	Media
26	MWM130	Lectura apoyo	—	Lean water (s/a)	Lean and Green water supply	Lectura de apoyo	Lean, eficiencia	Permite reducir pérdidas	Base para gestión eficiente del agua	Alta
27	MWM130	Lectura apoyo	—	WWTP improvement (s/a)	Continuous improvement wastewater	Lectura de apoyo	Mejora continua	Permite optimizar sistemas	Base para operación hidráulica	Alta

FICHA 1— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM110 – Evaluación de los recursos.

Clase 1 – Observación de la Tierra y percepción remota aplicada a recursos hídricos.

Profesor: R. Suárez.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Percepción remota; satélite; DEM; SIG; recursos hídricos; observación de la Tierra; Copernicus; información geoespacial; modelación hidrológica; evaluación de recursos; análisis espacial; disponibilidad hídrica.

Tema central

Uso de herramientas de observación de la Tierra, percepción remota y sistemas de información geográfica para la evaluación de los recursos hídricos, mediante el análisis de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y bases de datos geoespaciales, con el fin de apoyar la planificación, gestión y modelación del recurso agua a escala de cuenca.

Idea fundamental

- La evaluación moderna de los recursos hídricos requiere información espacial continua y de gran escala.
- La percepción remota permite obtener datos del territorio sin necesidad de mediciones directas en terreno, lo que facilita el análisis de grandes cuencas.
- Los modelos digitales de elevación permiten analizar la topografía, el escurrimiento y la delimitación de cuencas hidrográficas.

- Los sistemas de información geográfica permiten integrar distintas fuentes de datos para la modelación hidrológica y la toma de decisiones.
 - Las plataformas de datos abiertos permiten evaluar disponibilidad hídrica, cambios temporales y efectos de la variabilidad climática.
-

Cita clave

La percepción remota y los sistemas de información geográfica permiten generar información territorial integrada, fundamental para la evaluación, planificación y gestión de los recursos hídricos.

Redacción propia

La clase establece que la evaluación de los recursos hídricos debe basarse en el análisis espacial del territorio utilizando herramientas de percepción remota, modelos digitales de terreno y sistemas de información geográfica, ya que estas permiten caracterizar la cuenca, estimar escurrimientos, identificar zonas de acumulación y evaluar la disponibilidad del recurso en distintos escenarios, lo cual resulta esencial para el diseño de obras hidráulicas y la planificación del uso del agua.

¿Para qué sirve?

- Evaluar disponibilidad hídrica a escala de cuenca
 - Analizar escurrimientos superficiales
 - Identificar zonas de regulación natural o artificial
 - Apoyar estudios de planificación hídrica
 - Evaluar proyectos de riego y regulación
 - Analizar efectos de sequía o cambio climático
-

Aplicación en hidráulica

- Delimitación de cuencas hidrográficas
 - Generación y análisis de DEM
 - Modelación hidrológica
 - Evaluación de disponibilidad de agua
 - Diseño de embalses y acumuladores
 - Evaluación de obras de regulación lateral
 - Estudios de planificación de recursos hídricos
-

Material relevante

Imágenes satelitales

Modelos digitales de elevación (DEM)

SIG

Copernicus

IDE Chile

Datos geoespaciales

Análisis espacial

Observación de la Tierra

Modelación hidrológica

FICHA 2— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM110 – Evaluación de los recursos.

Clase 2 – Modelos digitales de elevación, análisis espacial e índices espectrales aplicados a la evaluación de recursos hídricos.

Profesor: R. Trujillo.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

DEM; NDWI; SIG; análisis espacial; cuencas hidrográficas; percepción remota; imágenes satelitales; escurrimiento; modelación hidrológica; disponibilidad hídrica; evaluación de recursos; geoprocusamiento.

Tema central

Uso de modelos digitales de elevación, imágenes satelitales e índices espectrales para el análisis del territorio y la evaluación de los recursos hídricos, mediante herramientas de sistemas de información geográfica que permiten delimitar cuencas, estimar escurrimientos, identificar cuerpos de agua y analizar la disponibilidad del recurso.

Idea fundamental

- Los modelos digitales de elevación permiten representar la topografía y analizar el comportamiento del escurrimiento superficial.
- El análisis espacial permite delimitar cuencas hidrográficas y determinar áreas de aporte.
- Los índices espectrales permiten identificar agua, humedad del suelo y cobertura vegetal.

- La integración de datos satelitales y SIG permite evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en distintas escalas.
 - La evaluación de recursos requiere combinar información geomorfológica, hidrológica y espacial.
-

Cita clave

El uso de modelos digitales de elevación y análisis espacial permite caracterizar el comportamiento hidrológico de una cuenca y estimar la disponibilidad de recursos hídricos de forma integrada.

Redacción propia

La clase explica que la evaluación de los recursos hídricos puede realizarse mediante el uso de modelos digitales de terreno, imágenes satelitales e índices espectrales, los cuales permiten analizar la topografía, delimitar cuencas, estimar escurrimientos y detectar cuerpos de agua, lo que constituye una base fundamental para la planificación hidráulica y el diseño de obras de regulación o acumulación.

¿Para qué sirve?

- Delimitar cuencas hidrográficas
 - Identificar áreas de aporte
 - Estimar escurrimientos
 - Detectar cuerpos de agua
 - Evaluar disponibilidad hídrica
 - Apoyar estudios de planificación
-

Aplicación en hidráulica

- Estudios de cuenca
 - Evaluación de disponibilidad de agua
 - Diseño de embalses
 - Ubicación de acumuladores
 - Evaluación de captaciones
 - Modelación hidrológica
 - Evaluación de obras de regulación lateral
-

Material relevante

DEM

NDWI

Imágenes satelitales

SIG

Curvas de nivel

Raster

Geoprocesamiento

Modelación espacial

Análisis de cuencas

Datos satelitales

FICHA 3— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM110 – Evaluación de los recursos.

Clase 3 – Modelación hidrológica y evaluación de recursos mediante modelos numéricos.

Profesor: R. Flores.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Modelo hidrológico; simulación; calibración; validación; escurrimiento; balance hídrico; parámetros; incertidumbre; evaluación de recursos; modelación; disponibilidad hídrica; escenarios.

Tema central

Uso de modelos hidrológicos para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos, mediante la simulación del comportamiento de una cuenca, la calibración de parámetros y el análisis de distintos escenarios, con el fin de apoyar la planificación y gestión del recurso agua.

Idea fundamental

- Los modelos hidrológicos permiten representar el comportamiento del ciclo hidrológico mediante ecuaciones y parámetros.
- La calibración del modelo es necesaria para que los resultados representen correctamente la realidad.
- La validación permite verificar que el modelo funcione en distintos periodos.
- La modelación permite analizar escenarios de sequía, cambio climático o intervención humana.

- La evaluación de recursos hídricos debe considerar incertidumbre y variabilidad temporal.
-

Cita clave

La modelación hidrológica permite simular el comportamiento de una cuenca y evaluar la disponibilidad de recursos hídricos bajo distintos escenarios, apoyando la toma de decisiones en la gestión del agua.

Redacción propia

La clase explica que la evaluación de los recursos hídricos requiere el uso de modelos hidrológicos que permitan simular el comportamiento de la cuenca, estimar caudales y analizar distintos escenarios de disponibilidad, ya que las mediciones históricas no son suficientes para la planificación, siendo necesario calibrar y validar los modelos para obtener resultados confiables.

¿Para qué sirve?

- Evaluar disponibilidad de agua
 - Simular escurrimientos
 - Analizar sequías
 - Evaluar proyectos hidráulicos
 - Estimar caudales futuros
 - Apoyar planificación hídrica
-

Aplicación en hidráulica

- Estudios de disponibilidad hídrica
- Diseño de embalses
- Evaluación de captaciones
- Evaluación de acumulación lateral
- Planificación de riego

- Evaluación de impacto de sequía
 - Estudios de balance hídrico
-

Material relevante

Modelos hidrológicos

Series de caudal

Series de precipitación

Parámetros del modelo

Calibración

Validación

Simulación de escenarios

Balance hídrico

Análisis de incertidumbre

FICHA 4 — MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM110 – Evaluación de los recursos.

Clase 4 – Incertidumbre, análisis de sensibilidad y evaluación de escenarios en modelación hidrológica.

Profesor: R. Flores.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Incertidumbre; sensibilidad; calibración; validación; escenarios; modelación hidrológica; parámetros; variabilidad; simulación; gestión hídrica; planificación; evaluación de recursos.

Tema central

Análisis de incertidumbre y sensibilidad en modelos hidrológicos, evaluando cómo la variación de parámetros, datos de entrada y condiciones climáticas afecta los resultados del modelo, con el fin de mejorar la confiabilidad de la evaluación de recursos hídricos y apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua.

Idea fundamental

- Todo modelo hidrológico contiene incertidumbre asociada a los datos y parámetros.
- El análisis de sensibilidad permite identificar qué variables influyen más en los resultados.
- La evaluación de escenarios permite analizar condiciones futuras o extremas.

- La confiabilidad del modelo depende de la calibración y validación.
 - La planificación hídrica debe considerar la variabilidad climática y la incertidumbre.
-

Cita clave

La evaluación de recursos hídricos mediante modelos requiere analizar la incertidumbre y la sensibilidad de los parámetros, ya que las decisiones de gestión deben considerar distintos escenarios posibles y no un único resultado.

Redacción propia

La clase explica que los modelos hidrológicos no entregan resultados exactos, por lo que es necesario evaluar la incertidumbre y la sensibilidad de los parámetros para entender cómo cambian los resultados ante distintas condiciones, lo que permite analizar escenarios de sequía, cambio climático o variaciones en la disponibilidad de agua, siendo fundamental para la planificación de recursos hídricos.

¿Para qué sirve?

- Evaluar confiabilidad de modelos
 - Analizar escenarios futuros
 - Evaluar sequías
 - Evaluar cambio climático
 - Mejorar planificación hídrica
 - Reducir riesgo en decisiones
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad hídrica
 - Estudios de cuenca
 - Diseño de embalses
 - Evaluación de acumuladores
 - Evaluación de proyectos de riego
 - Planificación bajo escasez hídrica
 - Evaluación bajo prorrata
-

Material relevante

Análisis de sensibilidad
Análisis de incertidumbre
Escenarios hidrológicos
Modelos hidrológicos
Series climáticas
Calibración
Validación
Simulación
Gestión de recursos
Planificación hídrica

FICHA 5 — MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

A Review on Hydrological Models.

Lectura básica – MWM110 Evaluación de los recursos.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Modelo hidrológico; simulación; escurrimiento; balance hídrico; calibración; validación; cuencas; disponibilidad hídrica; modelación; recursos hídricos.

Tema central

Revisión de los principales modelos hidrológicos utilizados para simular el comportamiento del ciclo hidrológico en cuencas, permitiendo estimar caudales, analizar disponibilidad hídrica y apoyar la planificación y gestión de los recursos hídricos.

Idea fundamental

- Los modelos hidrológicos permiten representar matemáticamente el ciclo del agua.
 - Existen distintos tipos de modelos según el nivel de detalle y la escala.
 - La calibración es necesaria para ajustar el modelo a datos reales.
 - La validación permite verificar la confiabilidad del modelo.
 - Los modelos son fundamentales para evaluar disponibilidad de agua.
-

Cita clave

Los modelos hidrológicos permiten simular el comportamiento de una cuenca y evaluar la disponibilidad de recursos hídricos bajo distintas condiciones climáticas y de uso del suelo.

Redacción propia

La lectura presenta una revisión de los modelos hidrológicos utilizados para evaluar recursos hídricos, explicando que la simulación del ciclo hidrológico permite estimar caudales y disponibilidad de agua, lo que resulta fundamental para la planificación de obras hidráulicas, la gestión del riego y el análisis de escenarios de escasez.

¿Para qué sirve?

- Evaluar disponibilidad hídrica
 - Simular caudales
 - Analizar sequías
 - Evaluar proyectos hidráulicos
 - Estudiar cuencas
 - Apoyar planificación
-

Aplicación en hidráulica

- Estudios de cuenca
 - Evaluación de disponibilidad de agua
 - Diseño de embalses
 - Evaluación de acumulación lateral
 - Planificación de riego
 - Gestión bajo escasez
 - Análisis de prorrata
-

Material relevante

Modelos hidrológicos
Series de caudal
Series de precipitación
Parámetros
Calibración
Validación
Balance hídrico
Simulación

FICHA 6— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Global sensitivity analysis in hydrological modeling.

Lectura básica – MWM110 Evaluación de los recursos.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Sensibilidad; incertidumbre; modelo hidrológico; parámetros; calibración; simulación; variabilidad; disponibilidad hídrica; análisis de escenarios; evaluación de recursos.

Tema central

Análisis de sensibilidad en modelos hidrológicos para evaluar cómo la variación de los parámetros y datos de entrada afecta los resultados del modelo, permitiendo mejorar la confiabilidad de la simulación y la evaluación de los recursos hídricos.

Idea fundamental

- Los modelos hidrológicos contienen incertidumbre asociada a parámetros y datos.
- El análisis de sensibilidad permite identificar qué variables influyen más en los resultados.
- La calibración mejora la precisión del modelo.
- La evaluación de escenarios permite analizar condiciones futuras o extremas.
- La planificación hídrica debe considerar la variabilidad climática.

Cita clave

El análisis de sensibilidad es una herramienta fundamental para evaluar la confiabilidad de los modelos hidrológicos y comprender cómo la variación de los parámetros afecta la estimación de los recursos hídricos.

Redacción propia

La lectura explica que los modelos hidrológicos no entregan resultados exactos, por lo que es necesario analizar la sensibilidad de los parámetros y la incertidumbre de los datos, con el fin de evaluar la confiabilidad de las simulaciones y poder utilizar los resultados en la planificación y gestión de los recursos hídricos bajo condiciones variables.

¿Para qué sirve?

- Evaluar confiabilidad de modelos
 - Analizar incertidumbre
 - Simular escenarios futuros
 - Evaluar sequías
 - Mejorar planificación hídrica
 - Reducir riesgo en decisiones
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad hídrica
- Estudios de cuenca
- Diseño de embalses
- Evaluación de acumuladores
- Evaluación de proyectos de riego
- Planificación bajo escasez
- Evaluación bajo prorrata

Material relevante

Análisis de sensibilidad

Análisis de incertidumbre

Parámetros del modelo

Simulación

Escenarios hidrológicos

Series climáticas

Calibración

Validación

FICHA 7— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Satellite Remote Sensing for Water Resources Management.

Lectura de apoyo – MWM110 Evaluación de los recursos.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Percepción remota; satélite; recursos hídricos; SIG; DEM; imágenes satelitales; cuencas; monitoreo; disponibilidad hídrica; análisis espacial; observación de la Tierra.

Tema central

Uso de sensores remotos y datos satelitales para la evaluación, monitoreo y gestión de los recursos hídricos, permitiendo analizar el comportamiento del agua en grandes áreas mediante información geoespacial y modelos digitales del terreno.

Idea fundamental

- La percepción remota permite obtener información hidrológica sin mediciones directas.
 - Las imágenes satelitales permiten analizar grandes cuencas.
 - Los modelos digitales de elevación permiten estudiar el escurrimiento.
 - Los SIG permiten integrar distintas fuentes de información.
 - La observación de la Tierra es fundamental para la gestión del agua.
-

Cita clave

La percepción remota permite evaluar el estado y la disponibilidad de los recursos hídricos a diferentes escalas espaciales, apoyando la planificación y la toma de decisiones en la gestión del agua.

Redacción propia

La lectura explica que el uso de sensores remotos y modelos digitales de elevación permite evaluar los recursos hídricos a escala de cuenca, facilitando el análisis del escurrimiento, la identificación de cuerpos de agua y la estimación de la disponibilidad hídrica, lo que resulta fundamental para la planificación hidráulica y la gestión del recurso en condiciones de variabilidad climática.

¿Para qué sirve?

- Evaluar disponibilidad hídrica
 - Analizar cuencas
 - Identificar cuerpos de agua
 - Estimar escurrimiento
 - Apoyar planificación
 - Evaluar proyectos hidráulicos
-

Aplicación en hidráulica

- Delimitación de cuencas
- Generación de DEM
- Evaluación de disponibilidad de agua
- Diseño de embalses
- Ubicación de acumuladores
- Evaluación de regulación lateral
- Estudios de planificación hídrica

Material relevante

Imágenes satelitales

DEM

SIG

Datos geoespaciales

Observación de la Tierra

Sensores remotos

Modelación espacial

Análisis de cuencas

FICHA 8— MWM110 Evaluación de los recursos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Intensification of hydrological drought in California by human water management.

Lectura de apoyo – MWM110 Evaluación de los recursos.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Sequía hidrológica; disponibilidad hídrica; gestión del agua; escasez; caudal; regulación; cuencas; demanda; recursos hídricos; planificación; variabilidad climática.

Tema central

Análisis del efecto de la gestión humana del agua sobre la intensificación de la sequía hidrológica, evaluando cómo la extracción, regulación y uso del recurso pueden modificar la disponibilidad de agua en una cuenca, especialmente en condiciones de escasez.

Idea fundamental

- La sequía hidrológica depende tanto del clima como de la gestión del agua.
 - La regulación y extracción pueden intensificar la escasez.
 - La disponibilidad hídrica debe evaluarse considerando demanda y oferta.
 - La planificación debe considerar escenarios de sequía.
 - La gestión del recurso influye en el régimen de caudales.
-

Cita clave

La disponibilidad de agua en una cuenca no depende únicamente de las condiciones climáticas, sino también de las decisiones de gestión y del uso humano del recurso.

Redacción propia

La lectura muestra que la escasez hídrica no solo es consecuencia de la falta de precipitaciones, sino también de la forma en que se administra el recurso, ya que la regulación, el riego y las extracciones pueden modificar el régimen natural de caudales, por lo que la evaluación de recursos hídricos debe considerar tanto factores naturales como decisiones de gestión.

¿Para qué sirve?

- Analizar escasez hídrica
 - Evaluar disponibilidad de agua
 - Estudiar efectos de la regulación
 - Evaluar demanda y oferta
 - Apoyar planificación hídrica
 - Analizar escenarios de sequía
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad hídrica
 - Planificación de recursos
 - Estudios de cuenca
 - Diseño de obras de regulación
 - Evaluación bajo prorrata
 - Gestión en condiciones de sequía
 - Análisis de distribución de agua
-

Material relevante

Series de caudal

Series climáticas

Datos de extracción

Modelos hidrológicos

Análisis de cuencas

Escenarios de sequía

Gestión del agua

Balance hídrico

FICHA 9 — MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Clase 1 – Why plan – System planning – Water resources.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Planificación hídrica; recursos hídricos; gestión integrada; sistema hídrico; incertidumbre; cambio climático; demanda de agua; oferta de agua; planificación por cuencas; gestión del recurso; seguridad hídrica; planificación territorial.

Tema central

La planificación de los recursos hídricos como herramienta fundamental para gestionar sistemas complejos, considerando la variabilidad climática, la incertidumbre futura, la demanda creciente y la necesidad de optimizar el uso del agua mediante un enfoque integrado a distintas escalas.

Idea fundamental

- Los sistemas hídricos deben analizarse como sistemas complejos con componentes físicos, sociales, económicos e institucionales.
- La planificación permite anticipar problemas de escasez y conflictos entre usuarios.
- La gestión del agua debe realizarse a distintas escalas, como cuenca, región o sistema de riego.
- La planificación moderna debe considerar incertidumbre climática y cambio climático.

- La gestión integrada permite equilibrar oferta, demanda, infraestructura y regulación.
-

Cita clave

La planificación de los recursos hídricos permite gestionar sistemas complejos bajo condiciones de incertidumbre, considerando múltiples escalas y actores, con el fin de optimizar el uso del agua y reducir la vulnerabilidad frente a la escasez.

Redacción propia

La clase explica que la planificación de los recursos hídricos es necesaria para enfrentar la variabilidad climática, el aumento de la demanda y las limitaciones del recurso, especialmente en zonas con escasez. La gestión del agua debe realizarse de manera integrada, considerando la cuenca como unidad de análisis y utilizando herramientas que permitan evaluar escenarios futuros, optimizar la distribución y reducir riesgos asociados a sequías o cambios en la disponibilidad hídrica.

¿Para qué sirve?

- Planificar el uso del agua
 - Evaluar disponibilidad hídrica
 - Analizar escenarios futuros
 - Reducir conflictos por el agua
 - Diseñar infraestructura hidráulica
 - Apoyar la gestión de cuencas
 - Mejorar la distribución del recurso
-

Aplicación en hidráulica

- Planificación de sistemas de riego
 - Diseño de embalses
 - Evaluación de regulación de caudales
 - Gestión de canales
 - Estudios de disponibilidad hídrica
 - Evaluación de acumuladores
 - Análisis de sistemas bajo escasez
 - Planificación de obras de regulación lateral
-

Material relevante

Planificación hídrica

Gestión integrada de recursos hídricos

Escalas de planificación

Cambio climático

Escasez hídrica

Oferta y demanda

Sistema hídrico

Cuenca hidrográfica

Infraestructura hidráulica

Seguridad hídrica

FICHA 10 — MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Clase 2 – Water governance in Chile: availability, management and climate change.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Gobernanza del agua; disponibilidad hídrica; gestión del agua; cambio climático; escasez hídrica; Chile; instituciones hídricas; derechos de agua; cuencas; gestión integrada; seguridad hídrica; regulación; usuarios del agua.

Tema central

La gobernanza del agua en Chile y su relación con la disponibilidad hídrica, el cambio climático y la gestión del recurso, considerando el rol de las instituciones, los usuarios, la regulación y la planificación en un contexto de creciente escasez.

Idea fundamental

- La disponibilidad de agua depende tanto de factores naturales como de la forma en que se gestiona el recurso.
- La gobernanza del agua involucra instituciones, normas, usuarios y mecanismos de regulación.
- En Chile existe una fuerte variabilidad climática y desigual distribución espacial del recurso.
- El cambio climático aumenta la incertidumbre y la frecuencia de sequías.

- La gestión del agua requiere coordinación entre actores y planificación a nivel de cuenca.

Cita clave

La gestión del agua no depende solo de la disponibilidad física del recurso, sino también de la forma en que las instituciones, las normas y los usuarios organizan su uso, especialmente en contextos de escasez y cambio climático.

Redacción propia

La clase explica que la gobernanza del agua corresponde al conjunto de normas, instituciones y actores que participan en la gestión del recurso hídrico. En Chile, la disponibilidad de agua se ve afectada por la variabilidad climática, la distribución desigual del recurso y el aumento de la demanda, lo que obliga a mejorar la planificación y la coordinación entre usuarios. La gestión a nivel de cuenca y el fortalecimiento institucional son elementos fundamentales para enfrentar la escasez hídrica y los efectos del cambio climático.

¿Para qué sirve?

- Analizar la gestión del agua en Chile
- Comprender la escasez hídrica
- Evaluar conflictos por el agua
- Apoyar la planificación hídrica
- Analizar políticas públicas
- Entender el rol de las instituciones
- Evaluar la gestión por cuencas

Aplicación en hidráulica

- Gestión de sistemas de riego
 - Distribución de caudales
 - Regulación de canales
 - Administración de derechos de agua
 - Evaluación de disponibilidad hídrica
 - Planificación de obras hidráulicas
 - Gestión de recursos bajo prorrata
 - Evaluación de alternativas de acumulación
-

Material relevante

Gobernanza del agua
Disponibilidad hídrica
Cambio climático
Escasez hídrica
Instituciones hídricas
Derechos de agua
Gestión por cuencas
Usuarios del agua
Planificación hídrica
Seguridad hídrica

FICHA 11— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Clase 3 – Climate change and water resources management.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Cambio climático; recursos hídricos; variabilidad climática; sequía; adaptación; disponibilidad hídrica; escenarios climáticos; gestión del agua; seguridad hídrica; planificación; incertidumbre; estrés hídrico.

Tema central

Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos y la necesidad de adaptar la planificación y gestión del agua para enfrentar escenarios de mayor incertidumbre, reducción de caudales y aumento de la frecuencia de sequías.

Idea fundamental

- El cambio climático modifica el régimen de precipitaciones y escurrimientos.
 - La disponibilidad de agua se vuelve más variable e incierta.
 - Aumenta la frecuencia de sequías prolongadas.
 - La planificación hídrica debe considerar escenarios futuros.
 - La adaptación requiere mejorar la gestión, la eficiencia y la regulación del recurso.
-

Cita clave

El cambio climático introduce incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos, por lo que la planificación debe incorporar escenarios futuros y estrategias de adaptación para reducir la vulnerabilidad frente a la escasez.

Redacción propia

La clase explica que el cambio climático afecta directamente la disponibilidad de agua debido a la disminución de precipitaciones, el aumento de la temperatura y la mayor frecuencia de sequías. Esto obliga a replantear la planificación de los recursos hídricos, incorporando escenarios futuros y estrategias de adaptación que permitan asegurar el abastecimiento, mejorar la eficiencia y reducir la vulnerabilidad de los sistemas hidráulicos, especialmente en zonas semiáridas.

¿Para qué sirve?

- Analizar el impacto del cambio climático
 - Evaluar disponibilidad futura de agua
 - Planificar bajo incertidumbre
 - Diseñar estrategias de adaptación
 - Mejorar la gestión hídrica
 - Evaluar riesgos de sequía
 - Apoyar decisiones de planificación
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad futura
- Diseño de obras de regulación
- Planificación de embalses
- Evaluación de acumuladores laterales
- Gestión de sistemas de riego
- Análisis de prorrata

- Evaluación de caudales bajo sequía
 - Planificación de infraestructura hidráulica
-

Material relevante

Cambio climático

Sequía

Escasez hídrica

Escenarios climáticos

Disponibilidad hídrica

Adaptación

Planificación hídrica

Gestión del agua

Seguridad hídrica

Variabilidad climática

FICHA 12— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Clase)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Clase 4 – Hydrological planning and basin management.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Planificación hidrológica; cuencas hidrográficas; gestión integrada; balance hídrico; oferta y demanda; regulación; planificación por cuencas; gestión sostenible; disponibilidad de agua; infraestructura hidráulica; gestión del recurso; seguridad hídrica.

Tema central

La planificación hidrológica basada en la cuenca hidrográfica como unidad de gestión, considerando el balance entre oferta y demanda de agua, la regulación mediante infraestructura y la necesidad de coordinar usuarios e instituciones para asegurar el uso sostenible del recurso.

Idea fundamental

- La cuenca hidrográfica es la unidad básica para la planificación del agua.
 - La planificación hidrológica requiere conocer la oferta y la demanda del recurso.
 - La regulación del agua se realiza mediante infraestructura hidráulica.
 - La gestión debe considerar múltiples usuarios y usos.
 - La planificación permite reducir conflictos y mejorar la eficiencia.
-

Cita clave

La planificación hidrológica debe realizarse a nivel de cuenca, integrando la disponibilidad natural del recurso, la demanda de los usuarios y las obras de regulación, con el fin de asegurar un uso sostenible del agua.

Redacción propia

La clase explica que la planificación hidrológica se realiza tomando la cuenca como unidad de análisis, ya que en ella se produce el escurrimiento, la acumulación y la distribución del agua. Para una adecuada gestión es necesario conocer la disponibilidad hídrica, la demanda de los distintos usuarios y las obras existentes, de modo que se pueda planificar la regulación del recurso mediante embalses, canales u otras infraestructuras, permitiendo enfrentar períodos de escasez y mejorar la eficiencia en la distribución.

¿Para qué sirve?

- Analizar cuencas hidrográficas
 - Evaluar disponibilidad de agua
 - Planificar obras hidráulicas
 - Analizar oferta y demanda
 - Reducir conflictos por el agua
 - Mejorar la distribución
 - Apoyar la gestión integrada
-

Aplicación en hidráulica

- Diseño de embalses
- Evaluación de acumuladores laterales
- Planificación de canales
- Regulación de caudales
- Gestión de sistemas de riego
- Evaluación de disponibilidad en cuencas

- Planificación bajo escasez
 - Análisis de distribución con prorrata
-

Material relevante

Cuenca hidrográfica

Planificación hidrológica

Balance hídrico

Oferta y demanda

Infraestructura hidráulica

Regulación

Gestión integrada

Disponibilidad hídrica

Escasez

Seguridad hídrica

FICHA 13— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Why Plan? System Planning and Water Resources Management.

Material de lectura MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Planificación hídrica; gestión del agua; sistema hídrico; planificación por cuencas; incertidumbre; demanda de agua; oferta de agua; gestión integrada; toma de decisiones; seguridad hídrica; planificación estratégica; recursos hídricos.

Tema central

La necesidad de planificar los recursos hídricos para enfrentar la variabilidad natural, la incertidumbre futura y el aumento de la demanda, mediante un enfoque sistemático que permita tomar decisiones informadas sobre el uso, regulación y distribución del agua.

Idea fundamental

- La planificación permite anticipar problemas de escasez y conflictos por el agua.
 - Los sistemas hídricos deben analizarse como sistemas complejos.
 - La gestión del agua requiere considerar múltiples usos y usuarios.
 - La planificación debe basarse en información técnica y escenarios futuros.
 - La toma de decisiones debe equilibrar oferta, demanda e infraestructura.
-

Cita clave

La planificación de los recursos hídricos es necesaria para gestionar sistemas complejos bajo condiciones de incertidumbre, permitiendo tomar decisiones que aseguren el uso eficiente y sostenible del agua.

Redacción propia

La lectura explica que la planificación de los recursos hídricos es fundamental para enfrentar la variabilidad climática, el aumento de la demanda y la limitada disponibilidad de agua. La gestión debe realizarse considerando el sistema completo, incluyendo la cuenca, los usuarios y la infraestructura existente, de modo que sea posible evaluar escenarios futuros y definir estrategias que permitan asegurar el uso sostenible del recurso.

¿Para qué sirve?

- Planificar el uso del agua
 - Evaluar disponibilidad hídrica
 - Analizar escenarios futuros
 - Reducir conflictos entre usuarios
 - Diseñar infraestructura hidráulica
 - Mejorar la gestión de cuencas
 - Apoyar la toma de decisiones
-

Aplicación en hidráulica

- Planificación de sistemas de riego
- Evaluación de obras de regulación
- Diseño de embalses
- Gestión de canales
- Evaluación de acumuladores
- Análisis de disponibilidad hídrica

- Planificación bajo escasez
 - Evaluación de alternativas de almacenamiento
-

Material relevante

Planificación hídrica

Sistema hídrico

Oferta y demanda

Gestión integrada

Escenarios futuros

Infraestructura hidráulica

Cuenca hidrográfica

Seguridad hídrica

Escasez

Gestión del agua

FICHA 14— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Water governance in Chile: availability, management and climate change.
Material de lectura MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.
Profesor: J. Martín-Vide.
Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Gobernanza del agua; Chile; disponibilidad hídrica; cambio climático; escasez hídrica; gestión del agua; derechos de agua; cuencas hidrográficas; instituciones; seguridad hídrica; planificación hídrica; usuarios del agua.

Tema central

La gobernanza del agua en Chile y su relación con la disponibilidad del recurso, el cambio climático y la gestión institucional, destacando la importancia de la planificación, la regulación y la coordinación entre usuarios para enfrentar escenarios de escasez hídrica.

Idea fundamental

- La disponibilidad de agua en Chile es muy variable en el espacio y en el tiempo.
 - La gestión del agua depende de normas, instituciones y usuarios.
 - El cambio climático aumenta la frecuencia de sequías.
 - La asignación del agua puede generar conflictos entre usuarios.
 - La planificación por cuencas permite mejorar la gestión del recurso.
-

Cita clave

La gobernanza del agua no depende únicamente de la disponibilidad natural del recurso, sino también de la forma en que las instituciones, las normas y los usuarios organizan su uso, especialmente en contextos de escasez y cambio climático.

Redacción propia

La lectura describe que la gestión del agua en Chile está determinada tanto por la disponibilidad natural del recurso como por el marco institucional que regula su uso. La distribución desigual de las precipitaciones, el aumento de la demanda y los efectos del cambio climático generan situaciones de escasez que requieren mejorar la planificación, fortalecer la gestión por cuencas y coordinar a los distintos usuarios, con el fin de asegurar un uso eficiente y sostenible del agua.

¿Para qué sirve?

- Analizar la disponibilidad hídrica en Chile
 - Comprender la escasez de agua
 - Evaluar conflictos por el recurso
 - Analizar la gestión institucional
 - Apoyar la planificación hídrica
 - Evaluar políticas públicas
 - Comprender la gestión por cuencas
-

Aplicación en hidráulica

- Gestión de sistemas de riego
- Distribución de caudales
- Administración de derechos de agua
- Evaluación de disponibilidad hídrica
- Planificación de obras hidráulicas
- Gestión de canales

- Evaluación de prorrata
 - Análisis de alternativas de acumulación
-

Material relevante

Gobernanza del agua
Disponibilidad hídrica
Cambio climático
Escasez hídrica
Derechos de agua
Gestión por cuencas
Instituciones
Usuarios del agua
Planificación hídrica
Seguridad hídrica

FICHA 15— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Adapting to climate change impacts on water resources.

Material de lectura MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Profesor: J. Martín-Vide.

Máster of Water Management, 2024.

Palabras claves

Cambio climático; adaptación; recursos hídricos; escasez hídrica; variabilidad climática; sequía; planificación hídrica; gestión del agua; escenarios futuros; resiliencia; seguridad hídrica; disponibilidad de agua.

Tema central

La necesidad de adaptar la gestión de los recursos hídricos frente a los efectos del cambio climático, considerando la disminución de disponibilidad de agua, el aumento de la variabilidad climática y la necesidad de desarrollar estrategias de planificación más flexibles y resilientes.

Idea fundamental

- El cambio climático altera el régimen de precipitaciones.
 - Aumenta la frecuencia e intensidad de sequías.
 - La disponibilidad de agua será más incierta.
 - La planificación debe considerar escenarios futuros.
 - La adaptación requiere mejorar eficiencia, regulación y gestión.
-

Cita clave

La gestión de los recursos hídricos debe adaptarse al cambio climático mediante estrategias flexibles que permitan enfrentar la incertidumbre, reducir la vulnerabilidad y asegurar la disponibilidad del recurso en el futuro.

Redacción propia

La lectura explica que el cambio climático afecta directamente la disponibilidad de los recursos hídricos debido a la reducción de precipitaciones, el aumento de la temperatura y la mayor variabilidad climática. Frente a este escenario, la planificación del agua debe incorporar medidas de adaptación que permitan mejorar la eficiencia en el uso del recurso, aumentar la capacidad de regulación y reducir la vulnerabilidad de los sistemas hidráulicos, especialmente en zonas con escasez hídrica.

¿Para qué sirve?

- Analizar efectos del cambio climático
 - Evaluar disponibilidad futura de agua
 - Diseñar estrategias de adaptación
 - Planificar bajo incertidumbre
 - Reducir vulnerabilidad hídrica
 - Mejorar la gestión del agua
 - Apoyar decisiones de planificación
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad futura
- Diseño de obras de regulación
- Planificación de embalses
- Evaluación de acumuladores laterales
- Gestión de sistemas de riego
- Evaluación de caudales en sequía

- Planificación bajo escasez
 - Diseño de infraestructura hidráulica
-

Material relevante

Cambio climático

Adaptación

Escasez hídrica

Sequía

Escenarios futuros

Disponibilidad hídrica

Planificación hídrica

Gestión del agua

Seguridad hídrica

Resiliencia

FICHA 16 — MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2).

Informe a la Nación: Seguridad hídrica en Chile.

CR2, Chile, 2023.

Palabras claves

Seguridad hídrica; Chile; escasez hídrica; cambio climático; sequía; disponibilidad de agua; gestión del agua; crisis hídrica; resiliencia; planificación; cuencas; recursos hídricos.

Tema central

La seguridad hídrica en Chile y los desafíos asociados a la disminución de la disponibilidad de agua, el aumento de la demanda y los efectos del cambio climático, destacando la necesidad de mejorar la planificación, la gestión integrada y la regulación del recurso para enfrentar escenarios de escasez.

Idea fundamental

- Chile enfrenta una disminución sostenida de disponibilidad hídrica.
 - El cambio climático aumenta la frecuencia de sequías.
 - La demanda de agua ha crecido en agricultura, minería y ciudades.
 - La gestión actual presenta limitaciones institucionales.
 - La seguridad hídrica requiere planificación, regulación y adaptación.
-

Cita clave

La seguridad hídrica se ve amenazada por la disminución de la disponibilidad de agua, el aumento de la demanda y los efectos del cambio climático, lo que obliga a mejorar la planificación y la gestión integrada del recurso.

Redacción propia

El informe señala que Chile enfrenta una crisis hídrica caracterizada por la reducción de precipitaciones, el aumento de la temperatura y la creciente demanda de agua, lo que genera situaciones de escasez en distintas cuencas. Para enfrentar este escenario es necesario fortalecer la planificación, mejorar la gestión por cuencas y aumentar la capacidad de regulación mediante infraestructura y medidas de adaptación que permitan asegurar el abastecimiento en el largo plazo.

¿Para qué sirve?

- Analizar la crisis hídrica en Chile
 - Evaluar disponibilidad de agua
 - Justificar planificación hídrica
 - Analizar efectos del cambio climático
 - Evaluar gestión del recurso
 - Apoyar estudios de cuencas
 - Justificar obras de regulación
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de disponibilidad hídrica
- Planificación de embalses
- Diseño de acumuladores laterales
- Regulación de caudales
- Gestión de sistemas de riego
- Evaluación de prorrata

- Planificación bajo sequía
 - Estudios de cuencas
-

Material relevante

Seguridad hídrica
Escasez hídrica
Cambio climático
Sequía
Disponibilidad de agua
Gestión integrada
Planificación hídrica
Cuencas
Regulación
Resiliencia

FICHA 17— MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Caudales y variabilidad climática en la cuenca del río Aconcagua.

Material de apoyo MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.

Universidad de Chile / CR2 / estudio hidrológico.

Palabras claves

Variabilidad climática; caudales; cuencas hidrográficas; sequía; disponibilidad hídrica; cambio climático; escurrimiento; régimen hidrológico; déficit hídrico; Chile central; recursos hídricos; análisis hidrológico.

Tema central

Análisis de la variabilidad climática y su influencia en los caudales de una cuenca hidrográfica, mostrando cómo las sequías prolongadas y el cambio climático afectan la disponibilidad de agua y obligan a mejorar la planificación y gestión del recurso.

Idea fundamental

- Los caudales dependen directamente de las precipitaciones.
 - La variabilidad climática genera años secos y húmedos.
 - Se observa una tendencia a la disminución de caudales.
 - Las sequías prolongadas afectan la disponibilidad de agua.
 - La planificación hídrica debe considerar escenarios variables.
-

Cita clave

La variabilidad climática y la disminución de precipitaciones generan reducciones en los caudales de las cuencas, lo que aumenta la incertidumbre

en la disponibilidad de agua y obliga a mejorar la planificación y regulación del recurso.

Redacción propia

El estudio muestra que los caudales de los ríos presentan una alta variabilidad debido a los cambios en las precipitaciones y a los efectos del cambio climático. En las últimas décadas se ha observado una disminución en los escurrimientos, lo que genera problemas en la disponibilidad de agua para riego y otros usos. Esto hace necesario planificar el uso del recurso, mejorar la regulación y considerar alternativas de almacenamiento que permitan enfrentar períodos de sequía prolongada.

¿Para qué sirve?

- Analizar variabilidad de caudales
 - Evaluar disponibilidad hídrica
 - Justificar escasez de agua
 - Analizar sequías
 - Planificar recursos hídricos
 - Evaluar cuencas
 - Apoyar estudios hidrológicos
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de caudales disponibles
- Diseño de embalses
- Evaluación de acumuladores laterales
- Planificación de riego
- Regulación de canales
- Gestión bajo prorrata

- Estudios de disponibilidad hídrica
 - Planificación de obras hidráulicas
-

Material relevante

Variabilidad climática

Caudales

Sequía

Escurrimiento

Disponibilidad hídrica

Cambio climático

Cuenca hidrográfica

Déficit hídrico

Planificación hídrica

Regulación

FICHA 18 — MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Backcasting and exploratory scenarios to develop robust water strategies.
Material de apoyo MWM100 – Gestión y planificación de recursos hídricos.
van Vliet, M. & Kok, K.
Water Resources Management, 2013.

Palabras claves

Planificación hídrica; escenarios; backcasting; incertidumbre; cambio climático; estrategias robustas; gestión del agua; planificación adaptativa; recursos hídricos; toma de decisiones; resiliencia; gestión futura.

Tema central

Uso de escenarios futuros y metodologías de planificación adaptativa para desarrollar estrategias de gestión del agua que sean robustas frente a la incertidumbre climática, la variabilidad hidrológica y los cambios en la demanda.

Idea fundamental

- La planificación tradicional no es suficiente ante la incertidumbre futura.
 - El cambio climático aumenta la variabilidad de los recursos hídricos.
 - Es necesario analizar distintos escenarios posibles.
 - El método backcasting permite planificar desde un escenario futuro deseado.
 - Las estrategias deben ser robustas frente a distintos escenarios.
-

Cita clave

La planificación de los recursos hídricos debe considerar múltiples escenarios futuros y desarrollar estrategias robustas que permitan enfrentar la incertidumbre asociada al cambio climático y a la variabilidad de la disponibilidad de agua.

Redacción propia

La lectura explica que la gestión del agua debe adaptarse a un contexto de alta incertidumbre, debido al cambio climático y a la variabilidad hidrológica. Para ello se utilizan metodologías como el análisis de escenarios y el backcasting, que permiten evaluar distintos futuros posibles y diseñar estrategias que funcionen en condiciones variables. Este enfoque permite mejorar la planificación y reducir el riesgo de escasez, especialmente en sistemas de riego dependientes de caudales fluctuantes.

¿Para qué sirve?

- Planificar bajo incertidumbre
 - Analizar escenarios futuros
 - Diseñar estrategias adaptativas
 - Evaluar disponibilidad futura
 - Reducir riesgos de escasez
 - Apoyar la toma de decisiones
 - Mejorar la planificación hídrica
-

Aplicación en hidráulica

- Planificación de sistemas de riego
- Evaluación de acumuladores
- Diseño de embalses
- Regulación de caudales
- Gestión bajo sequía
- Evaluación de alternativas de almacenamiento

- Planificación de infraestructura
 - Análisis de escenarios de disponibilidad
-

Material relevante

Escenarios

Backcasting

Planificación adaptativa

Cambio climático

Incertidumbre

Disponibilidad hídrica

Gestión del agua

Estrategias robustas

Planificación hídrica

Resiliencia

FICHA 19 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Trilogía de la Calidad.

Material de lectura básica Asignatura 130.

Juran, J. M.

Juran Institute / Quality Control Handbook / Concepto de Quality Trilogy.

Palabras claves

Calidad; mejora continua; control de calidad; planificación; gestión de procesos; optimización; control estadístico; desempeño; eficiencia; gestión organizacional; mejora sistemática; evaluación de procesos; gestión de calidad total.

Tema central

Modelo de gestión de calidad basado en la trilogía de Juran, que establece que la calidad se logra mediante planificación, control y mejora continua de los procesos organizacionales.

Idea fundamental

- La calidad no ocurre por accidente, debe planificarse.
 - Los procesos deben ser controlados mediante medición.
 - La mejora continua es necesaria para aumentar el desempeño.
 - La gestión de calidad se aplica a cualquier organización.
 - La satisfacción del usuario es el objetivo principal.
 - La mejora requiere análisis sistemático.
 - La calidad reduce errores y costos.
-

Cita clave

La gestión de calidad se basa en tres procesos fundamentales: planificación de la calidad, control de la calidad y mejora de la calidad, los cuales permiten asegurar el cumplimiento de los requerimientos del usuario y el mejoramiento continuo del desempeño organizacional.

Redacción propia

La lectura explica que la calidad en una organización no depende solo del resultado final, sino del control y diseño de los procesos. La trilogía de Juran plantea que primero se debe planificar el sistema, luego controlar su funcionamiento y finalmente mejorar continuamente para aumentar la eficiencia. Este enfoque permite reducir errores, optimizar recursos y asegurar que el producto o servicio cumpla con los requisitos del usuario. El modelo puede aplicarse tanto en industrias como en servicios públicos, incluyendo la gestión de recursos hídricos y sistemas de riego.

¿Para qué sirve?

- Mejorar procesos
 - Controlar desempeño
 - Reducir errores
 - Optimizar recursos
 - Aumentar eficiencia
 - Evaluar resultados
 - Gestionar organizaciones
 - Aplicar mejora continua
-

Aplicación en hidráulica

- Gestión de canales de riego
- Control de distribución de agua
- Evaluación de eficiencia hidráulica
- Operación de embalses

- Gestión de SSR
 - Optimización de sistemas de riego
 - Control de caudales
 - Evaluación de proyectos hidráulicos
 - Mejora de operación en sequía
 - Gestión institucional del agua
-

Material relevante

Trilogía de Juran

Planificación

Control

Mejora continua

Gestión de calidad

Optimización

Procesos

Evaluación

Desempeño

Control estadístico

FICHA 20 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Basic Quality Tools in Continuous Improvement Process.

Material de lectura básica Asignatura 130.

Ishikawa, K. / Quality Control Tools / Continuous Improvement.

Palabras claves

Herramientas de calidad; mejora continua; diagrama de Ishikawa; histograma; Pareto; control de procesos; hojas de verificación; gráficos de control; análisis de causa; mejora de procesos; control estadístico; calidad total; diagnóstico.

Tema central

Uso de las siete herramientas básicas de calidad para analizar problemas, identificar causas, controlar procesos y mejorar el desempeño organizacional mediante métodos simples y sistemáticos.

Idea fundamental

- La mejora de procesos requiere herramientas de análisis.
 - Los problemas deben basarse en datos, no en opiniones.
 - Las herramientas básicas permiten detectar causas.
 - El control estadístico ayuda a mantener la calidad.
 - La mejora continua se basa en medición y análisis.
 - Las herramientas son simples pero muy efectivas.
 - Pueden aplicarse en cualquier organización.
-

Cita clave

Las siete herramientas básicas de calidad permiten identificar, analizar y resolver problemas en los procesos mediante el uso sistemático de datos, facilitando la mejora continua y el control del desempeño organizacional.

Redacción propia

La lectura explica que existen herramientas simples que permiten mejorar procesos sin necesidad de métodos complejos. Entre ellas están el diagrama de Pareto, el diagrama de causa-efecto, los histogramas, los gráficos de control, las hojas de verificación, los diagramas de dispersión y los diagramas de flujo. Estas herramientas permiten detectar problemas, analizar sus causas y controlar el funcionamiento del sistema. Su uso facilita la mejora continua y la toma de decisiones basadas en datos, lo que es fundamental en la gestión de organizaciones técnicas y sistemas hidráulicos.

¿Para qué sirve?

- Detectar problemas
 - Analizar causas
 - Controlar procesos
 - Mejorar desempeño
 - Evaluar resultados
 - Tomar decisiones con datos
 - Optimizar sistemas
 - Reducir errores
-

Aplicación en hidráulica

- Análisis de pérdidas en canales
- Evaluación de eficiencia de riego
- Control de caudales
- Diagnóstico de fallas en sistemas
- Evaluación de proyectos hidráulicos

- Control de operación de embalses
- Gestión de plantas sanitarias
- Análisis de datos hidrológicos
- Mejora de distribución bajo prorrata
- Evaluación de infraestructura

Material relevante

7 herramientas de calidad

Pareto

Ishikawa

Histograma

Gráficos de control

Hoja de verificación

Diagrama de flujo

Causa-efecto

Control estadístico

Mejora continua

FICHA 21 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

An approach for the application of statistical process control.

Material de lectura básica Asignatura 130.

Statistical Process Control (SPC) – Control estadístico de procesos.

Palabras claves

Control estadístico; SPC; variabilidad; gráficos de control; calidad; mejora continua; procesos; desviación; monitoreo; desempeño; análisis de datos; control de calidad; estabilidad; optimización.

Tema central

Uso del control estadístico de procesos para monitorear el desempeño, detectar variaciones, mantener la calidad y mejorar continuamente el funcionamiento de los sistemas productivos o de servicio.

Idea fundamental

- Todo proceso presenta variabilidad.
 - La variabilidad debe medirse para poder controlarla.
 - Los gráficos de control permiten detectar desviaciones.
 - Se deben diferenciar causas normales y causas especiales.
 - El control estadístico permite mantener estabilidad.
 - La mejora continua requiere monitoreo permanente.
 - El análisis de datos permite tomar mejores decisiones.
-

Cita clave

El control estadístico de procesos permite monitorear el desempeño mediante el análisis de la variabilidad, identificando desviaciones que

afectan la calidad y permitiendo aplicar acciones correctivas para mantener la estabilidad del sistema.

Redacción propia

La lectura explica que ningún proceso funciona exactamente igual en todo momento, ya que siempre existe variabilidad. El control estadístico de procesos permite medir esa variabilidad mediante datos y gráficos, con el fin de detectar cuando el sistema se está desviando de su funcionamiento normal. Esto permite corregir problemas antes de que se generen fallas mayores. El método es ampliamente utilizado en industrias, pero también puede aplicarse en sistemas hidráulicos, gestión del agua y operación de infraestructura, donde es necesario controlar caudales, eficiencia y funcionamiento de los sistemas.

¿Para qué sirve?

- Controlar procesos
 - Detectar errores
 - Monitorear desempeño
 - Reducir fallas
 - Mejorar calidad
 - Analizar datos
 - Mantener estabilidad
 - Optimizar sistemas
-

Aplicación en hidráulica

- Control de caudales en canales
- Monitoreo de distribución de agua
- Evaluación de eficiencia de riego
- Control de operación de embalses
- Seguimiento de niveles

- Evaluación de plantas sanitarias
- Control de calidad de agua
- Análisis de series hidrológicas
- Gestión bajo escasez hídrica
- Optimización de sistemas de riego

Material relevante

SPC

Variabilidad

Gráficos de control

Control estadístico

Monitoreo

Desviación

Calidad

Datos

Estabilidad

Mejora continua

FICHA 22 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura básica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

The Application of Six Sigma in Process Control of Raw Water Quality on Pharmaceutical Industry.

Material de lectura básica Asignatura 130.

Six Sigma – Control de procesos y mejora de calidad.

Palabras claves

Six Sigma; DMAIC; mejora continua; control de calidad; variabilidad; eficiencia; optimización; control estadístico; procesos; desempeño; reducción de errores; calidad total; monitoreo; gestión de procesos.

Tema central

Aplicación de la metodología Six Sigma para mejorar el control de procesos, reducir la variabilidad y aumentar la eficiencia mediante el uso de herramientas estadísticas y análisis sistemático.

Idea fundamental

- Six Sigma busca reducir errores en los procesos.
 - La mejora se realiza mediante el método DMAIC.
 - Se utilizan datos para analizar el desempeño.
 - El control estadístico permite detectar fallas.
 - La optimización reduce costos y pérdidas.
 - La calidad mejora cuando se controla la variabilidad.
 - La mejora continua requiere medición permanente.
-

Cita clave

La metodología Six Sigma permite mejorar el desempeño de los procesos mediante la reducción de la variabilidad y el uso de herramientas estadísticas que facilitan el control y la mejora continua del sistema.

Redacción propia

La lectura muestra cómo la metodología Six Sigma se utiliza para mejorar el control de procesos mediante el análisis de datos y la reducción de errores. El método DMAIC permite definir el problema, medir el desempeño, analizar las causas, mejorar el proceso y controlar los resultados. Este enfoque es útil en sistemas donde la calidad debe mantenerse dentro de límites definidos, como en plantas de tratamiento, sistemas hidráulicos o distribución de agua, donde pequeñas variaciones pueden generar grandes problemas.

¿Para qué sirve?

- Reducir errores
 - Mejorar procesos
 - Controlar calidad
 - Analizar datos
 - Optimizar desempeño
 - Reducir pérdidas
 - Tomar decisiones técnicas
 - Mejorar eficiencia
-

Aplicación en hidráulica

- Control de calidad de agua
- Operación de plantas sanitarias
- Control de caudales
- Evaluación de eficiencia de riego
- Optimización de sistemas hidráulicos
- Control de distribución

- Evaluación de proyectos
- Gestión de recursos hídricos
- Mejora de operación bajo sequía
- Control de infraestructura

Material relevante

Six Sigma

DMAIC

Variabilidad

Control estadístico

Optimización

Calidad

Mejora continua

Datos

Desempeño

Procesos

FICHA 23 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura básica / aplicada)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

An Effluent Treatment Plant's Procedure Improved by Employing the Kaizen Approach.

Material de lectura básica Asignatura 130.

Aplicación de Kaizen en planta de tratamiento.

Palabras claves

Kaizen; mejora continua; optimización; procesos; eficiencia; reducción de costos; calidad; gestión ambiental; tratamiento de agua; desempeño; control; mejora sistemática; gestión de procesos; productividad.

Tema central

Aplicación de la metodología Kaizen para mejorar el desempeño de una planta de tratamiento mediante pequeñas mejoras continuas orientadas a aumentar la eficiencia y reducir errores.

Idea fundamental

- La mejora continua se logra mediante cambios pequeños.
 - Los procesos deben evaluarse permanentemente.
 - La optimización reduce costos y fallas.
 - La participación del equipo mejora resultados.
 - La calidad se mantiene con control constante.
 - La eficiencia aumenta con mejoras progresivas.
 - La mejora continua es parte de la gestión moderna.
-

Cita clave

El enfoque Kaizen permite mejorar el desempeño de los procesos mediante cambios continuos y sistemáticos que reducen errores, aumentan la eficiencia y mejoran la calidad del sistema.

Redacción propia

La lectura describe cómo la metodología Kaizen se utiliza para mejorar el funcionamiento de una planta de tratamiento mediante ajustes progresivos en los procesos. En lugar de realizar grandes cambios, se aplican mejoras pequeñas que permiten optimizar el sistema, reducir costos y aumentar la eficiencia. Este enfoque puede aplicarse en cualquier organización, incluyendo sistemas hidráulicos, donde el control de caudales, la distribución del agua y la operación de infraestructura requieren ajustes constantes para mejorar el desempeño.

¿Para qué sirve?

- Mejorar procesos
 - Reducir errores
 - Aumentar eficiencia
 - Optimizar recursos
 - Controlar desempeño
 - Reducir costos
 - Mejorar calidad
 - Evaluar funcionamiento
-

Aplicación en hidráulica

- Optimización de canales
- Mejora de distribución de agua
- Evaluación de eficiencia de riego
- Operación de embalses
- Control de plantas sanitarias

- Gestión de SSR
- Mejora de infraestructura
- Ajuste de operación bajo sequía
- Optimización de sistemas hidráulicos
- Evaluación de proyectos

Material relevante

Kaizen

Mejora continua

Optimización

Procesos

Eficiencia

Calidad

Control

Evaluación

Gestión

Productividad

FICHA 24 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Identification of Lean and Green Wastes in a Water Supply Organization.

Material de apoyo Asignatura 130.

Cherrafi, A. et al.

Lean and Green management in water supply systems.

Palabras claves

Lean; green; desperdicios; eficiencia; gestión del agua; optimización; mejora continua; procesos; recursos hídricos; reducción de pérdidas; desempeño; gestión ambiental; calidad; productividad.

Tema central

Identificación de pérdidas operacionales y ambientales en organizaciones de suministro de agua mediante la aplicación de metodologías Lean y Green para mejorar la eficiencia y el desempeño del sistema.

Idea fundamental

- Los procesos presentan desperdicios que reducen eficiencia.
 - Lean permite identificar pérdidas operativas.
 - Green permite reducir impacto ambiental.
 - La mejora continua optimiza el uso de recursos.
 - La eficiencia aumenta al controlar procesos.
 - La gestión moderna integra calidad y sostenibilidad.
 - La optimización reduce costos y consumo.
-

Cita clave

La aplicación de metodologías Lean y Green permite identificar desperdicios en los procesos de suministro de agua, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo el impacto ambiental del sistema.

Redacción propia

La lectura explica que los sistemas de abastecimiento de agua pueden presentar pérdidas operativas, consumo innecesario de recursos y problemas de eficiencia. La metodología Lean permite identificar actividades que no agregan valor, mientras que el enfoque Green busca reducir el impacto ambiental. La combinación de ambos enfoques permite optimizar el funcionamiento del sistema y mejorar el uso del recurso hídrico. Este enfoque es aplicable en sistemas de riego, plantas sanitarias y organizaciones que administran infraestructura hidráulica.

¿Para qué sirve?

- Detectar pérdidas
 - Mejorar eficiencia
 - Reducir desperdicios
 - Optimizar recursos
 - Mejorar procesos
 - Reducir costos
 - Mejorar desempeño
 - Gestionar sistemas
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de pérdidas en canales
- Optimización de distribución de agua
- Gestión de organizaciones de usuarios
- Mejora de eficiencia de riego
- Evaluación de infraestructura hidráulica

- Operación de embalses
- Gestión de SSR
- Optimización de sistemas de acumulación
- Control de uso de agua
- Gestión bajo escasez hídrica

Material relevante

Lean

Green

Desperdicios

Eficiencia

Optimización

Gestión del agua

Procesos

Mejora continua

Sostenibilidad

Calidad

FICHA 25 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Lectura de apoyo)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Application of Continuous Improvement Strategy for Reducing Environmental Impact of a Wastewater Treatment Plant.

Material de apoyo Asignatura 130.

Continuous Improvement – Wastewater Treatment Plant.

Palabras claves

Mejora continua; tratamiento de aguas; eficiencia; gestión ambiental; optimización; calidad; procesos; control; desempeño; reducción de impacto; gestión de operaciones; productividad; evaluación; mejora sistemática.

Tema central

Aplicación de estrategias de mejora continua en una planta de tratamiento de aguas residuales para aumentar la eficiencia del proceso, reducir impactos ambientales y optimizar el uso de recursos.

Idea fundamental

- Los procesos pueden mejorarse de forma continua.
 - La evaluación permite detectar fallas.
 - La optimización reduce costos y contaminación.
 - La mejora continua aumenta eficiencia.
 - La gestión de calidad mejora resultados.
 - El control del proceso evita errores.
 - La sostenibilidad requiere optimización.
-

Cita clave

La aplicación de estrategias de mejora continua permite optimizar el funcionamiento de las plantas de tratamiento, reduciendo el impacto ambiental y mejorando la eficiencia del sistema mediante el control y análisis permanente de los procesos.

Redacción propia

La lectura describe cómo la aplicación de estrategias de mejora continua permite optimizar el funcionamiento de una planta de tratamiento mediante el análisis sistemático de sus procesos. A través del monitoreo, el control y la implementación de mejoras progresivas, se logra aumentar la eficiencia, reducir el consumo de recursos y disminuir el impacto ambiental. Este enfoque puede aplicarse también en sistemas hidráulicos, donde la operación de canales, embalses o sistemas de riego requiere ajustes constantes para mejorar el desempeño y adaptarse a condiciones variables.

¿Para qué sirve?

- Mejorar procesos
 - Reducir impacto ambiental
 - Optimizar recursos
 - Aumentar eficiencia
 - Controlar desempeño
 - Reducir costos
 - Evaluar funcionamiento
 - Mejorar calidad
-

Aplicación en hidráulica

- Optimización de sistemas de riego
- Evaluación de embalses
- Control de distribución de agua
- Gestión de plantas sanitarias

- Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Gestión de SSR
 - Optimización de infraestructura
 - Operación bajo escasez hídrica
 - Control de caudales
 - Evaluación de proyectos
-

Material relevante

Mejora continua

Optimización

Tratamiento de aguas

Eficiencia

Procesos

Control

Evaluación

Gestión ambiental

Calidad

Desempeño

FICHA 26 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Material de clases)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Material complementario Prof. Carvallo.

Asignatura 130 – Gestión de calidad y mejora continua.

Apuntes de clase.

Palabras claves

Gestión de calidad; mejora continua; procesos; control; eficiencia; productividad; herramientas de calidad; optimización; evaluación; desempeño; gestión organizacional; control estadístico; mejora sistemática; análisis de procesos.

Tema central

Principios de gestión de calidad y mejora continua aplicados al análisis de procesos, utilizando herramientas de control, evaluación de desempeño y optimización para aumentar la eficiencia organizacional.

Idea fundamental

- La calidad debe gestionarse mediante procesos.
 - Los resultados dependen del control del sistema.
 - La mejora continua requiere medición.
 - Las herramientas permiten analizar problemas.
 - La eficiencia se logra optimizando procesos.
 - La toma de decisiones debe basarse en datos.
 - La gestión moderna integra calidad y productividad.
-

Cita clave

La mejora continua se logra mediante el control sistemático de los procesos, el uso de herramientas de calidad y la evaluación permanente del desempeño organizacional.

Redacción propia

El material de clases presenta los principios básicos de la gestión de calidad y la mejora continua, mostrando que el desempeño de una organización depende del control de sus procesos y del uso de herramientas que permitan evaluar resultados. Se enfatiza que la optimización requiere medir, analizar y corregir de manera permanente. Estos conceptos pueden aplicarse en sistemas hidráulicos, donde el funcionamiento depende de la correcta operación, el control de variables y la evaluación constante de la eficiencia.

¿Para qué sirve?

- Analizar procesos
 - Controlar desempeño
 - Mejorar eficiencia
 - Evaluar resultados
 - Detectar problemas
 - Optimizar sistemas
 - Tomar decisiones
 - Aplicar mejora continua
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de canales
- Control de caudales
- Optimización de riego
- Gestión de embalses
- Evaluación de infraestructura
- Control de plantas sanitarias

- Gestión de SSR
- Mejora de distribución
- Evaluación de proyectos
- Gestión del recurso hídrico

Material relevante

Gestión de calidad

Procesos

Control

Evaluación

Optimización

Mejora continua

Herramientas

Datos

Desempeño

Productividad

FICHA 27 — Asignatura 130 Gestión de calidad y mejora de procesos

TIPO de lectura (Material de clases)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Material de clases Asignatura 130 – Gestión de calidad, eficiencia y mejora continua.

Presentaciones del curso.

TQM – Lean – Six Sigma – Mejora continua – Gestión de procesos.

Palabras claves

Eficiencia; calidad total; mejora continua; TQM; Lean; Six Sigma; optimización; procesos; productividad; control; evaluación; gestión; desempeño; reducción de pérdidas; análisis; eficiencia hídrica; gestión de recursos.

Tema central

Aplicación de metodologías de gestión de calidad y mejora continua para optimizar procesos, aumentar la eficiencia y reducir pérdidas mediante el uso de herramientas de análisis, control y evaluación del desempeño.

Idea fundamental

- La eficiencia depende del control del proceso.
 - La calidad se logra mediante mejora continua.
 - Lean elimina desperdicios.
 - Six Sigma reduce variabilidad.
 - TQM integra toda la organización.
 - La optimización reduce costos.
 - La gestión moderna se basa en datos.
 - La mejora requiere evaluación permanente.
-

Cita clave

La mejora continua y la gestión de calidad permiten optimizar los procesos mediante la reducción de desperdicios, el control de la variabilidad y el análisis sistemático del desempeño, aumentando la eficiencia del sistema.

Redacción propia

El material de clases explica que la gestión moderna se basa en mejorar continuamente los procesos mediante el uso de metodologías como Lean, Six Sigma y TQM. Estas herramientas permiten detectar errores, reducir pérdidas y aumentar la eficiencia del sistema. El enfoque se aplica tanto en industrias como en servicios y también en la gestión de recursos hídricos, donde es necesario optimizar el uso del agua, mejorar la operación de infraestructura y reducir pérdidas para enfrentar escenarios de escasez.

¿Para qué sirve?

- Mejorar eficiencia
 - Optimizar procesos
 - Reducir pérdidas
 - Controlar desempeño
 - Evaluar resultados
 - Tomar decisiones
 - Mejorar calidad
 - Gestionar recursos
-

Aplicación en hidráulica

- Optimización de sistemas de riego
- Gestión eficiente del agua
- Evaluación de embalses
- Control de distribución
- Gestión de organizaciones de usuarios

- Evaluación de eficiencia hídrica
- Reducción de pérdidas en canales
- Mejora de infraestructura
- Gestión bajo escasez
- Evaluación de alternativas de regulación

Material relevante

TQM

Lean

Six Sigma

Mejora continua

Eficiencia

Optimización

Procesos

Control

Evaluación

Gestión

ANEXO 2

Nº	Autor(es) / Año	Título	Tipo de lectura	Metodología	Relación con la tesina	Aporte principal	Relevancia
1	Zhou, Chen & Li (2023)	<i>A bilevel modeling approach for optimizing irrigation canal scheduling</i>	Complementaria–Específica	Optimización bilevel	Representa lógica jerárquica similar a la prorata	Marco conceptual de asignación bajo escasez	Media
2	Amini et al. (2021)	<i>Utilizing multi-criteria decision-making analysis and 3D modeling for irrigation dam site selection</i>	Complementaria	MCDA + DEM + modelación 3D	Selección de quebradas/sitios de acumulación	Criterios espaciales para ubicar almacenamiento	Media
3	Ruiz-Carmona & Najim (1991)	<i>Generalized predictive control of an irrigation canal reach</i>	Complementaria	Control predictivo (GPC)	Describe dinámica hidráulica de canales	Contexto teórico de control	Baja
4	Malaterre & Baume (1998)	<i>Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals</i>	Complementaria	Control adaptativo robusto	Canal como sistema dinámico complejo	Refuerza dificultad de control sin regulación	Baja
5	Besançon et al. (2004)	<i>First experimental results of nonlinear control in irrigation canals</i>	No relevante	Control no lineal experimental	Canal de laboratorio (escala reducida)	Sin aplicación a canal real largo	Muy baja
6	Gómez, Rodellar & Soler (2002)	<i>Un algoritmo para el diseño de un controlador en lazo abierto en canales de riego</i>	Complementaria	Control en lazo abierto	Contraste con operación empírica del Buzeta	Referencia teórica	Baja
7	Liu et al. (2019)	<i>Research on the coupled model of canal system optimization control and water distribution</i>	Fundamental	Simulación hidráulica + optimización	Muy alineado con HEC-RAS + escenarios	Referente metodológico directo	Alta
8	Wang et al. (2020)	<i>Hydrodynamic simulation and multi-objective optimization coupling for water transport and distribution</i>	Fundamental	Simulación + optimización multiobjetivo	Trade-offs eficiencia–equidad–pérdidas	Lenguaje de desempeño sistémico	Alta
9	Bolea & Puig (2016)	<i>Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal</i>	Complementaria	Control LPV multivariable	Canal largo con retardos	Complejidad hidráulica	Baja
10	Zhang et al. (2022)	<i>Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand</i>	Fundamental	Optimización + demanda de cultivos	Turnos y sincronía oferta–demanda	Justifica regulación de caudales	Alta
11	Brauman et al. (2015)	<i>Role of impoundment and irrigation in intensive agriculture watersheds</i>	Complementaria	Análisis hidrológico de cuenca	Rol del almacenamiento en agricultura	Justifica función del almacenamiento	Media
12	Li et al. (2018)	<i>Multiobjective optimization of daily scale irrigation schedules for rice</i>	Complementaria	Optimización multiobjetivo	Gestión de escasez diaria	Apoyo conceptual a escenarios	Media

13	Sun et al. (2020)	<i>A novel irrigation canal scheduling model adaptable to spatial-temporal variability</i>	Fundamental	Programación adaptable	Muy alineado a prorrata espacial	Marco metodológico clave	Alta
14	Chen et al. (2017)	<i>Water distribution and scheduling model of an irrigation canal system</i>	Fundamental	Modelo de distribución y turnos	Caso comparable a canal real	Apoyo directo al método	Alta
15	Liu et al. (2016)	<i>Optimizing irrigation regimes for foxtail millet (Setaria italica L.)</i>	No relevante	Optimización agronómica	Foco en cultivo específico	No aporta a canal	Muy baja
16	Rhoades et al. (1992)	<i>Three study decades on irrigation performance and salt concentrations and loads</i>	Complementaria	Análisis histórico	Consecuencias de mala gestión	Contexto de impactos	Media
17	Causapé et al. (2004)	<i>Long-term water balances in La Violada irrigation district (Spain)</i>	Complementaria	Balance hídrico de largo plazo	Comparación con sistema real	Apoya análisis de pérdidas	Media
18	Harou et al. (2009)	<i>Climate adaptation guidance: new roles for hydroeconomic analysis</i>	Complementaria	Hidroeconomía	Adaptación al cambio climático	Marco estratégico	Media
19	Torres-Bejarano et al. (2016)	<i>La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro</i>	Complementaria-Específica	Modelación EFDC	Uso de modelos en gestión real	Soporte metodológico	Media
20	Vos & Vincent (2011)	<i>Volumetric water control in a large-scale open canal irrigation system with many smallholders</i>	Fundamental	Estudio de caso institucional	Sistema real con turnos y escasez	Referente directo para Buzeta	Alta

FICHA 1 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Zhang, X., Li, Y., Liu, H., & Song, X. (2022).

Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand.

Agricultural Water Management.

Palabras claves

Optimización de riego; programación de canales; demanda hídrica; eficiencia; distribución de agua; turnos de riego; caudal; gestión de recursos; pérdidas; operación de canales; escasez hídrica; eficiencia hidráulica.

Tema central

Optimización de la distribución de agua en canales de riego mediante la sincronización entre la oferta hidráulica y la demanda hídrica de los cultivos, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema.

Idea fundamental

- La eficiencia del riego depende de la sincronización oferta–demanda
- La mala programación genera pérdidas de agua
- La variación de caudales afecta la distribución
- La optimización mejora la eficiencia hidráulica
- Los sistemas de riego requieren ajuste dinámico
- La gestión del canal impacta la productividad agrícola

- La regulación del flujo mejora el desempeño
 - La distribución eficiente reduce pérdidas
-

Cita clave

La descoordinación entre la entrega de agua en canales y la demanda real de los cultivos genera ineficiencias en el sistema de riego, las cuales pueden ser reducidas mediante modelos de optimización que ajusten la programación de los caudales.

Redacción propia

El artículo analiza cómo la programación de los turnos de riego influye directamente en la eficiencia del sistema hidráulico. Cuando la entrega de agua no coincide con la demanda real de los cultivos, se generan pérdidas y una menor productividad del recurso hídrico. A través de modelos de optimización, se puede mejorar la distribución, reducir fluctuaciones de caudal y aumentar la eficiencia del sistema. Este enfoque es altamente aplicable al Canal Buzeta, donde la operación bajo prorrata genera discontinuidades en la entrega de agua. La incorporación de acumulación lateral permitiría justamente regular el flujo y mejorar la sincronización entre oferta y demanda.

¿Para qué sirve?

- Optimizar distribución de agua
- Mejorar eficiencia hidráulica
- Reducir pérdidas en canales
- Mejorar programación de riego
- Evaluar desempeño del sistema
- Ajustar operación bajo escasez
- Mejorar uso del recurso hídrico
- Apoyar toma de decisiones

Aplicación en hidráulica

- Optimización de canales de riego
 - Evaluación de turnos de riego
 - Análisis de prorrata
 - Regulación de caudales
 - Diseño de acumulación lateral
 - Evaluación de eficiencia de distribución
 - Modelación de sistemas hidráulicos
 - Operación bajo escasez hídrica
 - Gestión de recursos hídricos
 - Evaluación de infraestructura de riego
-

Material relevante

Optimización

Distribución de agua

Demanda hídrica

Eficiencia

Canales de riego

Programación

Caudales

Pérdidas

Gestión hidráulica

Escasez

FICHA 2 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Amini, A., Mohammadi, K., & Alizadeh, M. (2021).

Utilizing multi-criteria decision-making analysis and 3D modeling for irrigation dam site and area selection.

Journal of Hydrology / Environmental Modeling (ajustar según versión final del paper).

Palabras claves

Selección de sitios; multicriterio; MCDA; modelación 3D; SIG; DEM; planificación hídrica; embalses; almacenamiento; análisis espacial; toma de decisiones; infraestructura hidráulica.

Tema central

Selección óptima de sitios para infraestructura de almacenamiento hídrico mediante el uso de herramientas multicriterio y modelación espacial, considerando variables técnicas, ambientales y territoriales.

Idea fundamental

- La ubicación de infraestructura hidráulica es crítica para su desempeño
- La selección de sitios debe considerar múltiples variables
- El análisis multicriterio permite evaluar alternativas
- Los SIG y DEM facilitan el análisis territorial
- La modelación 3D mejora la comprensión espacial
- La planificación hídrica requiere integración de factores

- La toma de decisiones debe ser sistemática
 - El almacenamiento depende del entorno geomorfológico
-

Cita clave

La selección de sitios para infraestructura hidráulica requiere integrar múltiples criterios técnicos, ambientales y espaciales, permitiendo identificar ubicaciones óptimas mediante herramientas de análisis multicriterio y modelación territorial.

Redacción propia

El artículo plantea una metodología para seleccionar sitios óptimos de almacenamiento hídrico utilizando análisis multicriterio y herramientas espaciales como SIG y modelos digitales de elevación. Este enfoque permite evaluar diferentes variables, como topografía, accesibilidad, disponibilidad de agua y restricciones ambientales, integrándolas en un proceso de toma de decisiones estructurado.

En el contexto del Canal Buzeta, este enfoque es especialmente relevante para identificar quebradas donde implementar sistemas de acumulación lateral. A diferencia de enfoques puramente hidráulicos, este método permite incorporar criterios territoriales y geomorfológicos, fundamentales para la viabilidad de los puntos de almacenamiento.

¿Para qué sirve?

- Seleccionar sitios de almacenamiento hídrico
- Evaluar alternativas de infraestructura
- Apoyar toma de decisiones territoriales
- Integrar variables físicas y ambientales
- Optimizar ubicación de embalses
- Reducir incertidumbre en planificación

- Evaluar viabilidad de proyectos
 - Mejorar planificación hídrica
-

Aplicación en hidráulica

- Identificación de quebradas para acumulación lateral
 - Selección de sitios para embalses
 - Evaluación territorial de infraestructura hidráulica
 - Análisis de cuencas y microcuencas
 - Planificación de obras de riego
 - Evaluación de accesibilidad y factibilidad
 - Integración SIG en proyectos hidráulicos
 - Diseño preliminar de soluciones de almacenamiento
 - Evaluación de condiciones geomorfológicas
 - Planificación bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Análisis multicriterio

SIG

DEM

Modelación 3D

Selección de sitios

Infraestructura hídrica

Planificación territorial

Evaluación espacial

Topografía

Decisión

FICHA 3 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (baja relevancia aplicada)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Ruiz-Carmona, J., & Najim, K. (1991).

Generalized predictive control of an irrigation canal reach.

IEEE Transactions / Control Engineering (ajustar revista según versión final).

Palabras claves

Control predictivo; GPC; canales de riego; modelación hidráulica; dinámica de flujo; control automático; sistemas hidráulicos; Saint-Venant; regulación de niveles; automatización.

Tema central

Aplicación de control predictivo (GPC) en canales de riego para regular niveles y caudales mediante modelos matemáticos derivados de ecuaciones hidráulicas.

Idea fundamental

- Los canales de riego pueden modelarse como sistemas dinámicos
- El control predictivo permite anticipar el comportamiento del flujo
- La regulación automática mejora estabilidad del sistema
- Las ecuaciones de Saint-Venant describen el flujo en canales
- Los modelos discretos permiten control computacional
- La predicción mejora la toma de decisiones operacionales
- El control reduce desviaciones en niveles y caudales
- La automatización requiere infraestructura adecuada

Cita clave

El control predictivo permite anticipar el comportamiento del flujo en canales de riego, ajustando las variables de control para mantener niveles y caudales dentro de rangos deseados.

Redacción propia

El artículo presenta la aplicación del control predictivo generalizado (GPC) en un tramo de canal de riego, utilizando modelos derivados de las ecuaciones de Saint-Venant para representar el comportamiento hidráulico. Este enfoque permite anticipar la evolución del sistema y ajustar las compuertas para mantener condiciones operativas estables.

Sin embargo, este tipo de soluciones está orientado a sistemas altamente controlados y automatizados, lo que difiere significativamente del caso del Canal Buzeta, donde la operación es principalmente manual y basada en turnos bajo prorrata. Por tanto, su aporte es principalmente conceptual, al reforzar la comprensión de la dinámica hidráulica del canal y las limitaciones del control sin regulación física.

¿Para qué sirve?

- Comprender dinámica hidráulica de canales
- Analizar sistemas de control en riego
- Evaluar regulación de niveles
- Entender modelos matemáticos hidráulicos
- Analizar control automático
- Identificar limitaciones operativas

- Apoyar modelación teórica
 - Comparar sistemas automatizados vs. reales
-

Aplicación en hidráulica

- Modelación de flujo en canales
 - Análisis de regulación de niveles
 - Evaluación de control hidráulico
 - Comparación con sistemas reales no automatizados
 - Identificación de limitaciones de control
 - Análisis de estabilidad hidráulica
 - Base teórica para simulación
 - Comprensión de dinámica de flujo
 - Evaluación de operación de compuertas
 - Análisis de sistemas hidráulicos complejos
-

Material relevante

Control predictivo

Modelación hidráulica

Ecuaciones de Saint-Venant

Simulación

Canales de riego

Regulación de flujo

Automatización

Dinámica hidráulica

Modelos matemáticos

Control

FICHA 4 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (baja relevancia aplicada)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Malaterre, P. O., & Baume, J. P. (1998).

Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals.

Journal of Irrigation and Drainage Engineering / Control Systems (ajustar según versión final).

Palabras claves

Control adaptativo; control predictivo; canales de riego; regulación hidráulica; sistemas dinámicos; incertidumbre; automatización; modelos hidráulicos; distribución de agua; estabilidad.

Tema central

Desarrollo de un sistema de control predictivo adaptativo y robusto para la regulación del flujo en canales de riego, considerando incertidumbres en el modelo hidráulico.

Idea fundamental

- Los canales de riego presentan incertidumbre en su comportamiento
- El control adaptativo permite ajustar el modelo en tiempo real
- El control robusto mejora la estabilidad del sistema
- La predicción ayuda a anticipar cambios en el flujo
- La regulación automática mejora la eficiencia hidráulica
- Los sistemas hidráulicos son no lineales y variables

- La operación depende de condiciones cambiantes
 - La automatización reduce errores operacionales
-

Cita clave

El control predictivo adaptativo permite mantener la estabilidad de la distribución de agua en canales de riego, incluso bajo condiciones de incertidumbre en los parámetros del sistema.

Redacción propia

El artículo presenta un enfoque de control adaptativo que permite regular el flujo en canales de riego considerando la variabilidad e incertidumbre del sistema hidráulico. Mediante la actualización continua del modelo, el sistema puede mantener condiciones estables de operación.

Sin embargo, este tipo de solución está orientado a sistemas altamente instrumentados y automatizados, lo cual no es representativo del Canal Buzeta, donde la operación se realiza mediante turnos manuales bajo condiciones de escasez hídrica. Por lo tanto, su aporte es principalmente conceptual, permitiendo entender la complejidad del comportamiento hidráulico y las limitaciones de control sin mecanismos de regulación física como la acumulación lateral.

¿Para qué sirve?

- Comprender sistemas hidráulicos complejos
- Analizar control bajo incertidumbre
- Evaluar estabilidad en canales
- Entender control adaptativo
- Comparar sistemas automatizados

- Identificar limitaciones de operación
 - Apoyar análisis conceptual
 - Evaluar desempeño hidráulico
-

Aplicación en hidráulica

- Análisis de regulación de caudales
 - Evaluación de estabilidad del flujo
 - Modelación de sistemas hidráulicos dinámicos
 - Comparación entre control automático y operación real
 - Identificación de incertidumbre hidráulica
 - Evaluación de sistemas complejos
 - Base teórica para simulación
 - Comprensión de variabilidad hidráulica
 - Evaluación de operación de canales
 - Análisis de control en infraestructura
-

Material relevante

Control adaptativo

Control predictivo

Modelación hidráulica

Incertidumbre

Simulación

Canales de riego

Regulación

Estabilidad

Automatización

Sistemas dinámicos

FICHA 5 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura No Relevante (muy baja aplicabilidad)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Besançon, G., Georges, D., & Bornard, G. (2004).

First experimental results of nonlinear control in irrigation canals.

IEEE / Control Systems Conference.

Palabras claves

Control no lineal; canales de riego; modelación hidráulica; control automático; dinámica de flujo; observadores; laboratorio; simulación; regulación; sistemas no lineales.

Tema central

Validación experimental de un sistema de control no lineal aplicado a un canal de riego en condiciones de laboratorio.

Idea fundamental

- Los canales de riego pueden modelarse como sistemas no lineales
- El control no lineal permite regular el comportamiento del flujo
- Se pueden utilizar observadores para estimar variables hidráulicas
- La simulación y experimentación permiten validar modelos
- El control mejora la estabilidad del sistema
- La modelación precisa permite mejor regulación
- Los sistemas hidráulicos son complejos
- El comportamiento del flujo puede controlarse en laboratorio

Cita clave

Los resultados experimentales demuestran que el control no lineal puede regular eficazmente el comportamiento del flujo en canales de riego bajo condiciones controladas.

Redacción propia

El artículo presenta resultados experimentales de un sistema de control no lineal aplicado a un canal de riego en laboratorio, demostrando que es posible regular el comportamiento del flujo mediante técnicas avanzadas de control. Sin embargo, el estudio se realiza en condiciones altamente controladas y a pequeña escala, lo que limita significativamente su aplicabilidad a sistemas reales.

En el caso del Canal Buzeta, que presenta una extensión considerable, operación manual y condiciones variables bajo escasez hídrica, este tipo de soluciones no es viable. Por lo tanto, su aporte a la tesina es prácticamente nulo, salvo como referencia teórica del comportamiento no lineal de los sistemas hidráulicos.

¿Para qué sirve?

- Comprender sistemas no lineales
- Analizar control hidráulico en laboratorio
- Validar modelos teóricos
- Estudiar dinámica de flujo
- Evaluar control experimental
- Analizar sistemas simplificados

- Comprender comportamiento hidráulico
 - Comparar teoría vs. realidad
-

Aplicación en hidráulica

- Modelación teórica de canales
 - Análisis de sistemas no lineales
 - Estudios experimentales
 - Simulación hidráulica
 - Evaluación de control en laboratorio
 - Comprensión de dinámica de flujo
 - Base conceptual de control
 - Análisis académico
-

Material relevante

Control no lineal
Modelación hidráulica
Simulación
Experimentos
Canales
Observadores
Dinámica de flujo
Sistemas no lineales
Control
Laboratorio

FICHA 6 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (baja relevancia aplicada)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Gómez, M., Rodellar, J., & Soler, J. (2002).

Un algoritmo para el diseño de un controlador en lazo abierto en canales de riego.

Revista de Ingeniería del Agua / Control de Sistemas (ajustar según versión final).

Palabras claves

Control en lazo abierto; canales de riego; modelación hidráulica; control de flujo; regulación; operación de canales; automatización; sistemas hidráulicos; predicción; distribución de agua.

Tema central

Desarrollo de un algoritmo de control en lazo abierto para la regulación de caudales en canales de riego, basado en modelos hidráulicos simplificados.

Idea fundamental

- El control en lazo abierto permite definir acciones sin retroalimentación
- La operación del canal puede preprogramarse
- Los modelos hidráulicos permiten anticipar el comportamiento del flujo
- La regulación depende de condiciones iniciales
- La precisión del control depende del modelo
- No considera perturbaciones en tiempo real

- Es más simple que el control en lazo cerrado
 - La eficiencia depende de la estabilidad del sistema
-

Cita clave

El control en lazo abierto permite programar la operación de un canal de riego mediante modelos hidráulicos, sin necesidad de retroalimentación en tiempo real.

Redacción propia

El artículo propone un algoritmo de control en lazo abierto para la regulación de caudales en canales de riego, utilizando modelos hidráulicos para anticipar el comportamiento del sistema. Este enfoque permite definir estrategias de operación sin necesidad de mediciones en tiempo real.

Sin embargo, este tipo de control presenta limitaciones importantes, ya que no considera perturbaciones, pérdidas variables ni condiciones cambiantes del sistema. En el caso del Canal Buzeta, donde existen pérdidas significativas, variabilidad de caudal y operación bajo prorrata, este enfoque resulta insuficiente. Por lo tanto, su aporte es principalmente conceptual, permitiendo contrastar entre sistemas idealizados y la operación real, reforzando la necesidad de soluciones físicas como la acumulación lateral.

¿Para qué sirve?

- Comprender control hidráulico básico
- Analizar operación predefinida de canales
- Evaluar limitaciones del control sin retroalimentación
- Entender modelos simplificados
- Comparar tipos de control
- Analizar estabilidad del sistema
- Evaluar eficiencia teórica
- Apoyar análisis conceptual

Aplicación en hidráulica

- Programación de operación de canales
 - Modelación hidráulica simplificada
 - Evaluación de control de caudales
 - Comparación entre control abierto y cerrado
 - Identificación de limitaciones operativas
 - Evaluación de sistemas teóricos
 - Análisis de comportamiento hidráulico
 - Comprensión de regulación de flujo
 - Evaluación de eficiencia operativa
 - Análisis de infraestructura hidráulica
-

Material relevante

Control en lazo abierto

Modelación hidráulica

Simulación

Regulación de flujo

Canales de riego

Operación

Algoritmos

Predicción

Distribución

Sistemas hidráulicos

FICHA 7 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Liu, Y., Chen, X., Wang, Z., & Zhang, L. (2019).

Research on the coupled model of canal system optimization control and water distribution.

Journal of Hydrology / Water Resources Management (ajustar según versión final del paper).

Palabras claves

Modelación hidráulica; optimización; distribución de agua; canales de riego; simulación; control de sistemas; gestión de recursos hídricos; eficiencia; operación de canales; modelación acoplada.

Tema central

Integración de modelos hidráulicos y modelos de optimización para mejorar la distribución del agua en sistemas de canales de riego, considerando restricciones operacionales y eficiencia del sistema.

Idea fundamental

- La distribución de agua depende de la hidráulica y la gestión
- La simulación hidráulica permite representar el sistema real
- La optimización mejora la asignación del recurso
- La integración de modelos permite mejores resultados
- Los sistemas de riego requieren enfoques acoplados
- La eficiencia depende de la operación del canal

- La toma de decisiones debe basarse en modelos
 - La distribución puede optimizarse bajo restricciones
-

Cita clave

La integración de modelos hidráulicos y modelos de optimización permite mejorar significativamente la eficiencia en la distribución del agua en sistemas de riego, considerando restricciones operacionales y condiciones reales del sistema.

Redacción propia

El artículo propone un enfoque acoplado que integra la simulación hidráulica del canal con modelos de optimización para mejorar la distribución del agua. Este enfoque permite representar de manera más realista el comportamiento del sistema y evaluar distintos escenarios operacionales, considerando restricciones físicas y de gestión.

Este planteamiento es altamente relevante para la tesina, ya que el Canal Buzeta cuenta con una modelación hidráulica desarrollada (HEC-RAS), la cual puede ser utilizada como base para analizar distintos escenarios de operación bajo prorrata. A partir de estos resultados, se pueden identificar sectores críticos del canal donde la implementación de acumulación lateral permitiría mejorar la continuidad del flujo y la eficiencia de distribución.

¿Para qué sirve?

- Integrar modelación hidráulica y optimización
- Evaluar escenarios de operación del canal
- Mejorar distribución de agua
- Analizar eficiencia del sistema
- Apoyar toma de decisiones
- Evaluar alternativas de gestión

- Optimizar uso del recurso hídrico
 - Analizar comportamiento del canal
-

Aplicación en hidráulica

- Uso de HEC-RAS para simulación del canal
 - Evaluación de escenarios bajo prorrata
 - Identificación de tramos críticos
 - Diseño de acumulación lateral
 - Evaluación de eficiencia de distribución
 - Análisis de pérdidas hidráulicas
 - Simulación de operación del canal
 - Optimización del sistema de riego
 - Evaluación de alternativas de gestión
 - Modelación de sistemas hidráulicos reales
-

Material relevante

Modelación hidráulica

Simulación

Optimización

Distribución de agua

Canales de riego

Escenarios

Eficiencia

Gestión hídrica

Sistema acoplado

HEC-RAS

FICHA 8 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Wang, J., Li, Y., Huang, G., & Liu, J. (2020).

Hydrodynamic simulation and multi-objective optimization coupling for water transport and distribution in canal systems.

Journal of Hydrology / Water Resources Management (ajustar según versión final).

Palabras claves

Simulación hidráulica; optimización multiobjetivo; distribución de agua; eficiencia; canales de riego; modelación; trade-off; gestión hídrica; caudales; pérdidas; sistemas hidráulicos.

Tema central

Integración de simulación hidráulica con optimización multiobjetivo para mejorar el transporte y distribución del agua en sistemas de canales, considerando múltiples criterios de desempeño.

Idea fundamental

- La distribución de agua implica múltiples objetivos simultáneos
- La simulación hidráulica representa el comportamiento del sistema
- La optimización permite mejorar la eficiencia del sistema
- Existen trade-offs entre distintos objetivos
- La eficiencia no es el único criterio relevante
- La gestión del agua requiere equilibrio entre variables

- Los sistemas de riego son complejos
 - La toma de decisiones debe considerar múltiples criterios
-

Cita clave

La integración de simulación hidráulica con optimización multiobjetivo permite evaluar simultáneamente distintos criterios de desempeño, mejorando la toma de decisiones en sistemas de distribución de agua.

Redacción propia

El artículo propone un enfoque que combina la simulación hidráulica con técnicas de optimización multiobjetivo para evaluar el desempeño de sistemas de distribución de agua en canales de riego. Este enfoque permite analizar simultáneamente diferentes objetivos, como eficiencia, equidad en la distribución y reducción de pérdidas.

En el contexto del Canal Buzeta, este enfoque es altamente aplicable, ya que la operación bajo prorrata implica conflictos entre distintos objetivos: asegurar el suministro a todos los usuarios, reducir pérdidas por infiltración y mantener continuidad en la entrega del agua. La implementación de acumulación lateral puede entenderse como una solución que mejora estos trade-offs, permitiendo regular el flujo y optimizar el sistema en múltiples dimensiones.

¿Para qué sirve?

- Evaluar múltiples objetivos en sistemas de riego
- Analizar eficiencia y equidad en distribución
- Identificar trade-offs en gestión hídrica
- Mejorar toma de decisiones
- Evaluar desempeño del sistema
- Optimizar distribución de agua

- Analizar escenarios operacionales
 - Apoyar planificación hidráulica
-

Aplicación en hidráulica

- Simulación hidráulica del canal Buzeta
 - Evaluación de escenarios bajo prorrata
 - Análisis de eficiencia vs. pérdidas
 - Evaluación de equidad en distribución
 - Diseño de acumulación lateral
 - Optimización del sistema de riego
 - Evaluación de desempeño hidráulico
 - Análisis de trade-offs
 - Gestión de recursos hídricos
 - Evaluación de alternativas de operación
-

Material relevante

Simulación hidráulica

Optimización multiobjetivo

Trade-offs

Distribución de agua

Eficiencia

Equidad

Canales de riego

Modelación

Escenarios

Gestión hídrica

FICHA 9 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (baja relevancia aplicada)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Bolea, Y., & Puig, V. (2016).

Gain-scheduling multivariable LPV control of an irrigation canal system.

Control Engineering Practice, 49, 81–94.

Palabras claves

Control LPV; gain-scheduling; canales de riego; control multivariable; modelación hidráulica; sistemas dinámicos; regulación de caudal; automatización; estabilidad; control avanzado.

Tema central

Diseño de un sistema de control multivariable basado en modelos LPV (Linear Parameter Varying) para regular el flujo en canales de riego con condiciones variables.

Idea fundamental

- Los canales de riego presentan comportamiento dinámico variable
- Los modelos LPV permiten representar cambios en el sistema
- El gain-scheduling ajusta el control según condiciones operativas
- El control multivariable permite gestionar múltiples puntos del canal
- La regulación mejora la estabilidad del sistema
- Los sistemas hidráulicos son no lineales y variables
- El control avanzado requiere modelación precisa
- La automatización mejora el desempeño del sistema

Cita clave

El uso de controladores LPV con gain-scheduling permite adaptar la regulación del canal a distintas condiciones operativas, mejorando la estabilidad del sistema.

Redacción propia

El artículo presenta un enfoque de control avanzado basado en modelos LPV y técnicas de gain-scheduling para regular el comportamiento hidráulico de canales de riego bajo condiciones variables. Este enfoque permite adaptar el sistema de control a distintos escenarios operacionales, mejorando la estabilidad del flujo.

Sin embargo, este tipo de soluciones está orientado a sistemas automatizados con alta instrumentación, lo cual no es representativo del Canal Buzeta. En este caso, la operación se realiza de forma manual, con presencia de pérdidas significativas y bajo condiciones de prorrata. Por lo tanto, su aporte es principalmente conceptual, permitiendo comprender la complejidad del sistema hidráulico, pero sin aplicabilidad directa en la solución propuesta de acumulación lateral.

¿Para qué sirve?

- Comprender sistemas hidráulicos variables
 - Analizar control avanzado en canales
 - Evaluar regulación de caudales
 - Entender modelos LPV
 - Analizar estabilidad del sistema
 - Comparar sistemas automatizados
 - Evaluar control multivariable
 - Apoyar análisis conceptual
-

Aplicación en hidráulica

- Análisis de comportamiento dinámico del canal
 - Evaluación de regulación de caudales
 - Modelación de sistemas hidráulicos variables
 - Comparación con sistemas reales
 - Identificación de limitaciones operativas
 - Evaluación de estabilidad hidráulica
 - Comprensión de sistemas complejos
 - Base teórica para simulación
 - Evaluación de control hidráulico
 - Análisis de infraestructura
-

Material relevante

Control LPV

Gain-scheduling

Modelación hidráulica

Simulación

Canales de riego

Control multivariable

Estabilidad

Automatización

Sistemas dinámicos

Regulación

FICHA 10 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Zhang, X., Li, Y., Liu, H., & Song, X. (2022).

Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand.

Agricultural Water Management, 269, 107684.

Palabras claves

Programación de riego; demanda hídrica; optimización; eficiencia; distribución de agua; turnos de riego; caudal; sincronización; pérdidas; gestión de recursos hídricos; eficiencia hidráulica.

Tema central

Optimización de la programación de riego en canales mediante la sincronización entre la oferta hidráulica y la demanda hídrica de los cultivos, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema.

Idea fundamental

- La eficiencia del riego depende de la sincronización oferta–demanda
- La mala programación genera pérdidas de agua
- La variabilidad de caudales afecta la distribución
- La optimización mejora el desempeño del sistema
- La entrega de agua debe ajustarse a la demanda real
- La descoordinación reduce productividad

- Los turnos afectan la eficiencia del riego
 - La regulación del flujo mejora el sistema
-

Cita clave

La descoordinación entre la entrega de agua en canales y la demanda hídrica de los cultivos reduce la eficiencia del sistema, pudiendo mejorarse mediante modelos de optimización que ajusten la programación de los caudales.

Redacción propia

El artículo analiza cómo la programación de los turnos de riego influye directamente en la eficiencia del sistema hidráulico. La falta de sincronización entre la entrega de agua por canal y la demanda real de los cultivos genera pérdidas, menor productividad y uso ineficiente del recurso hídrico.

Este enfoque es directamente aplicable al Canal Buzeta, donde la operación bajo prorrata implica una entrega discontinua del agua, muchas veces desalineada con la demanda real de los usuarios. La acumulación lateral se plantea como una solución que permite regular el flujo, reducir estas descoordinaciones y mejorar la eficiencia del sistema, al acercar la oferta a la demanda real.

¿Para qué sirve?

- Mejorar programación de riego
- Optimizar distribución de agua
- Reducir pérdidas hidráulicas
- Aumentar eficiencia del sistema
- Evaluar desempeño del canal
- Ajustar operación bajo escasez
- Mejorar uso del recurso hídrico
- Apoyar toma de decisiones

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de turnos de riego
 - Análisis de prorrata
 - Regulación de caudales
 - Optimización de canales de riego
 - Evaluación de eficiencia de distribución
 - Diseño de acumulación lateral
 - Modelación de sistemas hidráulicos
 - Evaluación de pérdidas
 - Gestión de recursos hídricos
 - Operación bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Optimización

Demanda hídrica

Distribución de agua

Eficiencia

Canales de riego

Programación

Caudales

Pérdidas

Gestión hidráulica

Escasez

FICHA 11 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (relevancia media)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Brauman, K. A., Siebert, S., & Foley, J. A. (2015).

Role of irrigation and impoundment in shaping agricultural watersheds.

Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 112(13), 3931–3936.

Palabras claves

Almacenamiento hídrico; embalses; riego; cuencas agrícolas; disponibilidad hídrica; regulación de caudales; gestión de recursos; escasez hídrica; eficiencia; hidrología.

Tema central

Evaluación del impacto del riego y de las estructuras de almacenamiento (impoundment) en la disponibilidad y distribución del agua dentro de cuencas agrícolas.

Idea fundamental

- El almacenamiento hídrico modifica la disponibilidad de agua
- Los embalses permiten regular caudales
- El riego altera el balance hídrico de la cuenca
- La regulación mejora la estabilidad del sistema
- El almacenamiento reduce variabilidad del flujo
- La disponibilidad de agua depende de la gestión
- Las cuencas agrícolas requieren intervención
- La infraestructura influye en la eficiencia hídrica

Cita clave

Las estructuras de almacenamiento hídrico desempeñan un rol fundamental en la regulación de caudales, permitiendo mejorar la disponibilidad y estabilidad del recurso en sistemas agrícolas.

Redacción propia

El artículo analiza cómo el almacenamiento hídrico, a través de embalses y otras estructuras de retención, influye en la dinámica del agua dentro de cuencas agrícolas. Se demuestra que la regulación de caudales permite reducir la variabilidad del recurso y mejorar su disponibilidad en el tiempo.

Este enfoque es directamente aplicable al caso del Canal Buzeta, donde la escasez hídrica y la operación bajo prorrata generan una distribución discontinua del agua. La implementación de acumulación lateral en quebradas puede interpretarse como una forma de almacenamiento distribuido, capaz de regular el flujo y mejorar la eficiencia del sistema de riego.

¿Para qué sirve?

- Justificar almacenamiento hídrico
 - Analizar regulación de caudales
 - Evaluar disponibilidad de agua
 - Entender dinámica de cuencas
 - Mejorar gestión hídrica
 - Reducir variabilidad del recurso
 - Apoyar planificación de infraestructura
 - Evaluar impacto del riego
-

Aplicación en hidráulica

- Justificación de acumulación lateral
 - Evaluación de embalses y almacenamiento
 - Regulación de caudales en canales
 - Gestión de cuencas agrícolas
 - Evaluación de disponibilidad hídrica
 - Diseño de soluciones de almacenamiento
 - Análisis de variabilidad del flujo
 - Optimización de sistemas de riego
 - Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Gestión bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Almacenamiento hídrico

Embalses

Regulación de caudales

Cuencas agrícolas

Disponibilidad hídrica

Variabilidad

Gestión de recursos

Riego

Eficiencia

Hidrología

FICHA 12 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (relevancia media)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D., & Li, T. (2018).

Multi-objective optimization of irrigation schedules at the daily scale for rice under water-saving irrigation.

Agricultural Water Management, 204, 142–154.

Palabras claves

Optimización multiobjetivo; programación de riego; eficiencia hídrica; escasez hídrica; demanda hídrica; ahorro de agua; cultivos; toma de decisiones; gestión de riego.

Tema central

Optimización de la programación de riego a escala diaria mediante un enfoque multiobjetivo, considerando simultáneamente eficiencia del uso del agua y productividad agrícola.

Idea fundamental

- La programación del riego puede optimizarse
- Existen múltiples objetivos en la gestión del agua
- La eficiencia y productividad pueden entrar en conflicto
- El uso eficiente del agua es clave en escasez
- La toma de decisiones debe considerar múltiples variables
- La optimización permite mejorar el desempeño

- La gestión del riego requiere análisis detallado
 - La variabilidad temporal afecta la distribución
-

Cita clave

La optimización multiobjetivo permite mejorar la eficiencia del uso del agua al considerar simultáneamente múltiples criterios, como productividad y ahorro hídrico, en la programación del riego.

Redacción propia

El artículo presenta un modelo de optimización multiobjetivo aplicado a la programación del riego, considerando simultáneamente la eficiencia del uso del agua y la productividad agrícola. Este enfoque permite identificar soluciones que equilibran distintos objetivos bajo condiciones de escasez hídrica.

En el contexto del Canal Buzeta, este enfoque es útil para entender que la gestión del agua no responde a un único criterio, sino a múltiples objetivos que deben equilibrarse, como la distribución equitativa, la eficiencia y la continuidad del suministro. La acumulación lateral puede interpretarse como una solución que mejora estos equilibrios, permitiendo una mejor regulación del flujo y una distribución más eficiente del recurso.

¿Para qué sirve?

- Optimizar programación de riego
- Mejorar eficiencia hídrica
- Evaluar múltiples objetivos
- Apoyar toma de decisiones
- Analizar escenarios de escasez
- Mejorar gestión del agua
- Reducir pérdidas
- Evaluar desempeño del sistema

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de escenarios de riego
 - Análisis de eficiencia del sistema
 - Optimización de distribución de agua
 - Evaluación de prorrata
 - Diseño de acumulación lateral
 - Análisis de trade-offs
 - Gestión de recursos hídricos
 - Evaluación de demanda hídrica
 - Optimización operativa
 - Planificación de sistemas de riego
-

Material relevante

Optimización multiobjetivo

Programación de riego

Eficiencia hídrica

Demanda hídrica

Escasez

Gestión del agua

Trade-offs

Escenarios

Modelación

Productividad

FICHA 13 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Sun, Y., Li, X., Wang, Z., & Chen, J. (2020).

A novel irrigation canal scheduling model adaptable to spatial-temporal variability.

Agricultural Water Management, 232, 106034.

Palabras claves

Programación de riego; variabilidad espacial; variabilidad temporal; distribución de agua; optimización; canales de riego; eficiencia; gestión hídrica; escasez hídrica; demanda variable.

Tema central

Desarrollo de un modelo de programación de riego capaz de adaptarse a la variabilidad espacial y temporal de la demanda hídrica en sistemas de canales.

Idea fundamental

- La demanda hídrica varía en el espacio y el tiempo
- Los sistemas de riego deben adaptarse a esta variabilidad
- La programación rígida reduce eficiencia
- La flexibilidad mejora la distribución del agua
- La variabilidad afecta el desempeño del sistema
- La gestión del canal debe ser dinámica

- La optimización mejora la asignación del recurso
 - La adaptación mejora la eficiencia hídrica
-

Cita clave

Los modelos de programación de riego deben considerar la variabilidad espacial y temporal de la demanda hídrica para mejorar la eficiencia y el desempeño de los sistemas de distribución de agua.

Redacción propia

El artículo propone un modelo de programación de riego que incorpora la variabilidad espacial y temporal de la demanda hídrica, permitiendo adaptar la distribución del agua a las condiciones reales del sistema. Este enfoque mejora significativamente la eficiencia en comparación con esquemas rígidos de distribución.

Este planteamiento es directamente aplicable al Canal Buzeta, donde la operación bajo prorrata genera una distribución rígida del agua, sin considerar variaciones en la demanda entre usuarios ni en el tiempo. La acumulación lateral se presenta como un mecanismo que permite introducir flexibilidad en el sistema, regulando el flujo y facilitando una distribución más adaptable a estas variaciones.

¿Para qué sirve?

- Mejorar programación de riego
- Adaptar distribución a condiciones reales
- Aumentar eficiencia hídrica
- Analizar variabilidad del sistema
- Mejorar gestión de canales
- Optimizar uso del recurso hídrico
- Evaluar desempeño del sistema
- Apoyar toma de decisiones

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de prorrata en canales
 - Análisis de variabilidad de demanda
 - Optimización de distribución de agua
 - Diseño de acumulación lateral
 - Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Gestión de sistemas de riego
 - Análisis de operación del canal
 - Adaptación de sistemas hidráulicos
 - Evaluación de escenarios de operación
 - Planificación bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Variabilidad espacial

Variabilidad temporal

Programación de riego

Distribución de agua

Eficiencia

Optimización

Canales de riego

Gestión hídrica

Demanda

Escasez

FICHA 14 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Chen, Y., Xu, Z., Li, J., & Wang, X. (2017).
Water distribution and scheduling model of an irrigation canal system.
Water Resources Management, 31(12), 3891–3906.

Palabras claves

Distribución de agua; programación de riego; modelación hidráulica; canales de riego; optimización; eficiencia; gestión hídrica; turnos; asignación de recursos; operación de canales.

Tema central

Desarrollo de un modelo de distribución y programación de agua en sistemas de canales de riego, considerando restricciones hidráulicas y operacionales para mejorar la eficiencia del sistema.

Idea fundamental

- La distribución de agua debe modelarse
- La programación influye en la eficiencia
- Los canales tienen restricciones hidráulicas
- La operación del sistema afecta el desempeño
- La asignación de agua puede optimizarse
- La gestión del canal es clave
- La eficiencia depende de la distribución
- Los sistemas requieren planificación estructurada

Cita clave

La modelación de la distribución y programación del agua en sistemas de riego permite mejorar la eficiencia del sistema al considerar restricciones hidráulicas y condiciones operacionales.

Redacción propia

El artículo presenta un modelo para la distribución y programación del agua en canales de riego, integrando restricciones hidráulicas y operacionales del sistema. Este enfoque permite representar de forma realista el funcionamiento del canal y evaluar distintas estrategias de distribución.

En el caso del Canal Buzeta, este tipo de modelación es directamente aplicable, ya que permite analizar cómo se distribuye el agua bajo condiciones de prorrata y cómo estas reglas afectan la eficiencia del sistema. A partir de estos resultados, se pueden identificar sectores donde la implementación de acumulación lateral permitiría mejorar la continuidad del flujo y optimizar la distribución.

¿Para qué sirve?

- Modelar distribución de agua
 - Evaluar programación de riego
 - Mejorar eficiencia del sistema
 - Analizar operación del canal
 - Optimizar asignación del recurso
 - Evaluar desempeño hidráulico
 - Apoyar toma de decisiones
 - Analizar restricciones del sistema
-

Aplicación en hidráulica

- Modelación del Canal Buzeta
 - Evaluación de prorrata
 - Análisis de distribución de caudales
 - Identificación de tramos críticos
 - Diseño de acumulación lateral
 - Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Simulación de escenarios
 - Optimización de sistemas de riego
 - Gestión de recursos hídricos
 - Evaluación de operación del canal
-

Material relevante

Distribución de agua

Programación de riego

Modelación hidráulica

Canales de riego

Eficiencia

Optimización

Asignación

Restricciones

Simulación

Gestión

FICHA 15 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura No Relevante (muy baja aplicabilidad)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Liu, X., Zhang, Y., Wang, E., Yang, X., & Li, L. (2016).

Optimizing irrigation regimes for foxtail millet (Setaria italica L.) based on crop water requirements.

Agricultural Water Management, 178, 148–158.

Palabras claves

Riego agrícola; cultivo; requerimientos hídricos; eficiencia del riego; optimización agronómica; producción agrícola; demanda hídrica; rendimiento; cultivo específico.

Tema central

Optimización del riego para un cultivo específico (foxtail millet), considerando requerimientos hídricos para maximizar la productividad.

Idea fundamental

- Cada cultivo tiene requerimientos hídricos específicos
- El riego puede optimizarse a nivel de cultivo
- La eficiencia depende de la aplicación en terreno
- El rendimiento agrícola depende del manejo del agua
- La programación del riego afecta la productividad
- El uso eficiente del agua mejora resultados
- La agronomía influye en el riego
- La demanda hídrica varía según cultivo

Cita clave

La optimización del régimen de riego basada en los requerimientos hídricos del cultivo permite mejorar la eficiencia del uso del agua y aumentar la productividad agrícola.

Redacción propia

El artículo analiza la optimización del riego a nivel de cultivo, considerando las necesidades hídricas específicas para mejorar la eficiencia y productividad agrícola. Este enfoque se centra en la escala predial y en el manejo agronómico del riego.

Sin embargo, este tipo de análisis no es directamente aplicable al problema del Canal Buzeta, ya que la tesina se enfoca en la distribución del agua a nivel de canal y no en la eficiencia del riego dentro de los predios. Por lo tanto, su aporte es muy limitado y no contribuye significativamente al desarrollo del modelo de acumulación lateral.

¿Para qué sirve?

- Optimizar riego a nivel de cultivo
 - Mejorar eficiencia agrícola
 - Evaluar requerimientos hídricos
 - Aumentar productividad
 - Analizar demanda hídrica
 - Evaluar manejo del riego
 - Apoyar decisiones agronómicas
 - Mejorar rendimiento
-

Aplicación en hidráulica

- Análisis de demanda hídrica de cultivos
 - Estimación de requerimientos de agua
 - Evaluación de uso del recurso
 - Apoyo a estudios agronómicos
 - Análisis de consumo de agua
 - Evaluación de eficiencia predial
 - Planificación agrícola
 - Estudios de riego a pequeña escala
-

Material relevante

Cultivos

Demanda hídrica

Riego agrícola

Productividad

Eficiencia

Requerimientos

Optimización

Agua

Producción

Agronomía

FICHA 16 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (relevancia media–alta)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992).

The use of saline waters for crop production / Three decades of irrigation performance and salt concentrations and loads.

FAO Irrigation and Drainage Paper / Water Resources Studies.

Palabras claves

Salinidad; rendimiento de riego; calidad de agua; drenaje; eficiencia; degradación de suelos; gestión hídrica; acumulación de sales; balance hídrico; impactos del riego.

Tema central

Evaluación de largo plazo del desempeño de sistemas de riego y su relación con la acumulación de sales, calidad del agua y efectos sobre la productividad agrícola.

Idea fundamental

- La mala gestión del riego genera acumulación de sales
- Las pérdidas de agua afectan la calidad del sistema
- La eficiencia del sistema influye en el suelo
- El drenaje es clave para evitar degradación
- El uso excesivo de agua puede ser perjudicial
- La calidad del agua impacta la producción

- La gestión del canal influye en el sistema agrícola
 - Los sistemas mal gestionados generan impactos acumulativos
-

Cita clave

La ineficiencia en la gestión del riego y la distribución del agua puede generar acumulación de sales en el suelo, afectando la productividad agrícola y la sostenibilidad del sistema.

Redacción propia

El artículo analiza el comportamiento de sistemas de riego a lo largo del tiempo, evidenciando cómo una mala gestión del agua puede generar problemas como acumulación de sales, degradación del suelo y pérdida de productividad. Se destaca que las pérdidas de agua, la mala distribución y el exceso de riego tienen impactos negativos en el sistema agrícola.

En el caso del Canal Buzeta, donde existen pérdidas significativas por infiltración y una distribución poco eficiente bajo prorrata, este enfoque permite evidenciar las consecuencias de una gestión ineficiente del recurso hídrico. La acumulación lateral puede contribuir a mejorar la regulación del flujo y reducir pérdidas, lo que indirectamente puede mitigar efectos negativos asociados a una mala distribución del agua.

¿Para qué sirve?

- Evaluar impactos de mala gestión hídrica
- Analizar eficiencia del sistema de riego
- Entender efectos de la salinidad
- Evaluar sostenibilidad del sistema
- Analizar pérdidas de agua
- Evaluar calidad del recurso hídrico
- Apoyar gestión de riego
- Mejorar planificación hidráulica

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de pérdidas en canales
 - Análisis de eficiencia hidráulica
 - Evaluación de impactos del riego
 - Gestión de calidad del agua
 - Análisis de sistemas de riego reales
 - Evaluación de sostenibilidad hidráulica
 - Identificación de problemas de distribución
 - Optimización del sistema de riego
 - Evaluación de infiltración
 - Gestión bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Salinidad

Calidad de agua

Eficiencia

Pérdidas

Degradación de suelo

Riego

Sostenibilidad

Drenaje

Impactos

Gestión hídrica

FICHA 17 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (relevancia media–alta)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Causapé, J., Quílez, D., & Aragüés, R. (2004).

Long-term water balances in an irrigation district (La Violada, Spain): I. Sequential assessment.

Agricultural Water Management, 64(2), 113–131.

Palabras claves

Balance hídrico; pérdidas de agua; infiltración; retorno; eficiencia; riego; canales; distribución de agua; hidrología; gestión hídrica.

Tema central

Evaluación del balance hídrico en un distrito de riego a largo plazo, identificando entradas, salidas y pérdidas del sistema.

Idea fundamental

- El balance hídrico permite entender el sistema
 - Existen pérdidas significativas en canales
 - La infiltración es una componente importante
 - El agua no utilizada genera retornos
 - La eficiencia del sistema depende de la gestión
 - La distribución afecta el balance hídrico
 - El análisis de largo plazo es necesario
 - Los sistemas de riego presentan ineficiencias
-

Cita clave

El análisis del balance hídrico permite identificar pérdidas significativas en sistemas de riego, especialmente asociadas a infiltración y distribución ineficiente del agua.

Redacción propia

El artículo evalúa el balance hídrico de un sistema de riego a lo largo del tiempo, identificando las principales fuentes de pérdidas, como infiltración, evaporación y retornos. Este análisis permite cuantificar la eficiencia del sistema y entender cómo se distribuye el agua dentro del canal y el territorio.

En el caso del Canal Buzeta, donde se han identificado pérdidas cercanas al 60–70%, este tipo de enfoque es fundamental para comprender el comportamiento real del sistema. La acumulación lateral puede contribuir a mejorar este balance, reduciendo pérdidas por infiltración y permitiendo una mejor gestión del recurso hídrico a lo largo del canal.

¿Para qué sirve?

- Analizar balance hídrico
 - Identificar pérdidas de agua
 - Evaluar eficiencia del sistema
 - Comprender comportamiento hidráulico
 - Apoyar gestión de riego
 - Evaluar uso del recurso hídrico
 - Mejorar planificación hidráulica
 - Analizar sistemas reales
-

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de pérdidas en el Canal Buzeta
- Análisis de infiltración

- Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Identificación de tramos críticos
 - Diseño de acumulación lateral
 - Evaluación de distribución de agua
 - Análisis de balance hídrico
 - Optimización del sistema de riego
 - Evaluación de retornos de agua
 - Gestión de recursos hídricos
-

Material relevante

Balance hídrico

Pérdidas

Infiltración

Eficiencia

Canales de riego

Distribución

Retornos

Hidrología

Gestión hídrica

Agua

FICHA 18 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria (relevancia media–alta, estratégica)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009).

Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects.
Journal of Hydrology, 375(3–4), 627–643.

Palabras claves

Hidroeconomía; escasez hídrica; optimización; asignación de recursos; eficiencia; toma de decisiones; gestión del agua; planificación; costo-beneficio; políticas públicas.

Tema central

Uso de modelos hidroeconómicos para optimizar la asignación del recurso hídrico bajo condiciones de escasez, integrando variables económicas y físicas.

Idea fundamental

- El agua es un recurso escaso que debe optimizarse
- La asignación del recurso puede modelarse
- La eficiencia tiene dimensión económica
- La toma de decisiones requiere integrar variables
- Los sistemas deben evaluarse en términos de beneficio
- La escasez obliga a priorizar usos

- La gestión del agua es multidimensional
 - La planificación mejora el uso del recurso
-

Cita clave

Los modelos hidroeconómicos permiten integrar variables físicas y económicas para optimizar la asignación del agua en condiciones de escasez.

Redacción propia

El artículo presenta el concepto de modelos hidroeconómicos, los cuales integran variables físicas del sistema hídrico con aspectos económicos para mejorar la toma de decisiones en la gestión del agua. Este enfoque permite evaluar alternativas de uso del recurso considerando eficiencia, costos y beneficios.

En el contexto del Canal Buzeta, este enfoque es relevante para justificar que la escasez hídrica no solo debe analizarse desde la hidráulica, sino también desde la eficiencia en la asignación del recurso. La acumulación lateral puede interpretarse como una medida que mejora la eficiencia del sistema, permitiendo un mejor aprovechamiento del agua disponible y reduciendo pérdidas, lo que tiene implicancias directas en el valor del recurso.

¿Para qué sirve?

- Analizar gestión del agua bajo escasez
- Evaluar eficiencia del uso del recurso
- Apoyar toma de decisiones
- Integrar variables económicas
- Optimizar asignación de agua
- Evaluar alternativas de gestión
- Analizar beneficios del sistema
- Mejorar planificación hídrica

Aplicación en hidráulica

- Evaluación de eficiencia del Canal Buzeta
 - Análisis de escasez hídrica
 - Evaluación de beneficios de acumulación lateral
 - Optimización del uso del agua
 - Apoyo a decisiones de inversión
 - Evaluación de alternativas de gestión
 - Análisis de costo-beneficio
 - Planificación de infraestructura
 - Gestión de recursos hídricos
 - Evaluación de políticas de riego
-

Material relevante

Hidroeconomía

Escasez hídrica

Optimización

Asignación

Eficiencia

Gestión

Planificación

Decisión

Costos

Beneficios

FICHA 19 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Complementaria–Específica (relevancia media)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Torres-Bejarano, F. M., Sánchez, J. D., & Pineda, L. (2016).

La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro (Colombia).

Revista Ingeniería y Competitividad, 18(2), 35–48.

Palabras claves

Modelación hidrodinámica; simulación; gestión hídrica; embalses; calidad de agua; dinámica del flujo; modelos numéricos; EFDC; hidráulica; gestión de recursos.

Tema central

Aplicación de modelación hidrodinámica para analizar el comportamiento del agua en un embalse y apoyar la toma de decisiones en su gestión.

Idea fundamental

- La modelación hidrodinámica permite representar sistemas reales
- Los modelos numéricos simulan el comportamiento del agua
- La gestión hídrica puede apoyarse en simulación
- Los sistemas hidráulicos requieren análisis detallado
- La modelación permite evaluar escenarios
- La toma de decisiones mejora con información técnica
- El comportamiento del agua es dinámico
- La simulación reduce incertidumbre

Cita clave

La modelación hidrodinámica permite simular el comportamiento del sistema hídrico, facilitando la evaluación de escenarios y apoyando la toma de decisiones en la gestión del recurso.

Redacción propia

El artículo presenta el uso de modelación hidrodinámica para analizar el comportamiento del agua en un embalse, permitiendo evaluar distintos escenarios de operación y apoyar la gestión del sistema. A través de modelos numéricos, se puede representar la dinámica del flujo y comprender mejor el funcionamiento del sistema.

En el caso del Canal Buzeta, este enfoque es relevante porque valida el uso de modelación hidráulica como herramienta de análisis, similar a la modelación realizada con HEC-RAS. Esta herramienta permite evaluar distintos escenarios de operación bajo prorrata y analizar cómo la implementación de acumulación lateral puede modificar el comportamiento del flujo en el sistema.

¿Para qué sirve?

- Modelar sistemas hidráulicos
 - Evaluar escenarios de operación
 - Apoyar toma de decisiones
 - Analizar comportamiento del agua
 - Reducir incertidumbre
 - Evaluar alternativas de gestión
 - Mejorar planificación hidráulica
 - Analizar sistemas reales
-

Aplicación en hidráulica

- Uso de modelación hidráulica en Canal Buzeta
 - Evaluación de escenarios con HEC-RAS
 - Análisis de comportamiento del flujo
 - Evaluación de acumulación lateral
 - Simulación de operación del canal
 - Apoyo a decisiones de gestión
 - Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Análisis de sistemas reales
 - Planificación de infraestructura
 - Gestión de recursos hídricos
-

Material relevante

Modelación hidrodinámica

Simulación

Embalses

Flujo

Gestión hídrica

Modelos numéricos

Escenarios

EFDC

Dinámica del agua

Análisis

FICHA 20 — Tesina Canal Buzeta

TIPO de lectura

Lectura Fundamental (caso real altamente relevante)

Referencia bibliográfica o dirección web completa

Vos, J., & Vincent, L. (2011).

Volumetric water control in a large-scale open canal irrigation system with many smallholders: the case of Chancay-Lambayeque, Peru.

Agricultural Water Management, 98(4), 705–714.

Palabras claves

Control volumétrico; canales de riego; distribución de agua; pequeños agricultores; gestión hídrica; escasez hídrica; eficiencia; asignación; operación de canales; equidad.

Tema central

Análisis de la implementación del control volumétrico del agua en un sistema de canales de gran escala con múltiples usuarios, evaluando su impacto en la distribución y gestión del recurso.

Idea fundamental

- La distribución de agua en canales con muchos usuarios es compleja
- El control volumétrico permite mejorar la asignación
- La equidad es un factor clave en la gestión hídrica
- Los sistemas reales presentan conflictos de distribución
- La escasez hídrica afecta la operación
- La gestión del canal influye en la eficiencia

- Los usuarios condicionan el sistema
 - La regulación mejora la distribución
-

Cita clave

La implementación de control volumétrico en sistemas de riego permite mejorar la equidad y eficiencia en la distribución del agua, especialmente en contextos con múltiples usuarios y recursos limitados.

Redacción propia

El artículo analiza un sistema de riego a gran escala en Perú, donde la distribución del agua se realiza entre múltiples pequeños agricultores bajo condiciones de escasez. Se estudia la implementación de control volumétrico como una herramienta para mejorar la equidad y eficiencia en la asignación del recurso.

Este caso es altamente comparable con el Canal Buzeta, ya que presenta características similares: múltiples usuarios, limitaciones en la disponibilidad de agua y desafíos en la distribución. Sin embargo, a diferencia del enfoque de control volumétrico, la tesina propone una solución basada en la acumulación lateral, la cual permite regular físicamente el flujo y mejorar la continuidad del suministro. Este paper permite validar que los problemas observados en Buzeta son estructurales y comunes en sistemas de riego reales.

¿Para qué sirve?

- Analizar sistemas reales de riego
- Evaluar distribución de agua en canales
- Comprender problemas de asignación
- Analizar equidad en distribución
- Evaluar eficiencia del sistema
- Apoyar gestión de recursos hídricos

- Analizar operación con múltiples usuarios
 - Evaluar soluciones de gestión
-

Aplicación en hidráulica

- Comparación con Canal Buzeta
 - Evaluación de prorrata
 - Análisis de distribución de agua
 - Evaluación de equidad en el sistema
 - Diseño de acumulación lateral
 - Análisis de sistemas reales
 - Gestión de múltiples usuarios
 - Evaluación de eficiencia hidráulica
 - Optimización de distribución
 - Gestión bajo escasez hídrica
-

Material relevante

Control volumétrico
Distribución de agua
Canales de riego
Usuarios
Equidad
Eficiencia
Gestión hídrica
Escasez
Asignación
Sistema real

ANEXO 3



CERTIFICADO

Salamanca, 09 de abril de 2026.

Correlativo N°J379-2029

La Junta de Vigilancia del Río Choapa y sus Afluentes, Rol Único Tributario N ° 73.278.600-7, certifica que:

- La distribución de aguas que realiza esta Organización se basa en la atención de las exigencias del Código de Aguas, el Estatuto, la orgánica y/o gobernanza general de la Organización, considera el análisis periódico de la disponibilidad hídrica de las fuentes ubicadas dentro de la jurisdicción y de las pérdidas resultantes del ejercicio de distribución, la cual se contrasta con los antecedentes sobre los derechos de aprovechamiento de aguas de los usuarios identificados en la matrícula oficial de usuarios desde donde se generan balances y escenarios de distribución. Por lo que, en el marco de sus facultades, en conformidad a los acuerdos de directorio y/o a los acuerdos y/o ratificación de la asamblea general de esta Junta de Vigilancia, se define la prorrata, la cual, se refiere a la alícuota que se obtiene según el cuociente entre la disponibilidad de agua y el total de derechos de aprovechamiento, permitiendo generar una distribución equivalente a cada usuario conforme a los derechos de aprovechamiento que le corresponden.
- La distribución desde el año 2020 hasta el 2025, ha sido desarrollada como se detalla en la tabla siguiente:

Año	Mes	Prorrata	Fecha Aplicación
2020	Enero	17%	01-ene-20
	Febrero	15%	03-feb-20
	Marzo	15%	01-mar-20
	Abril	15%	01-abr-20
	Mayo	10%	06-may-20
		8%	11-may-20
	Junio	6%	04-jun-20
	Julio	6%	01-jul-20
	Agosto	6%	01-ago-20
		10%	15-ago-20
	Septiembre	10%	01-sept-20
		15%	11-sept-20
	Octubre	15%	01-oct-20
		20%	21-oct-20
		25%	27-oct-20
	Noviembre	25%	01-nov-20
	Diciembre	20%	01-dic-20



Dimensiones:
✓ Desarrollo Organizacional
✓ Administración Financiera
✓ Operaciones Hidráulicas
✓ Vinculación

2021	Enero	20%	01-ene-21
		17%	07-ene-21
	Febrero	17%	01-feb-21
	Marzo	17%	01-mar-21
	Abril	17%	01-abr-21
		15%	12-abr-21
	Mayo	12%	01-may-21
		10%	10-may-21
	Junio	8%	01-jun-21
		6%	20-jun-21
	Julio	6%	01-jul-20
	Agosto	6%	01-ago-20
	Septiembre	10%	01-sept-20
	Octubre	10%	01-oct-20
		12%	04-oct-21
	Noviembre	12%	01-nov-20
	Diciembre	12%	01-dic-21
		10%	03-dic-21
	Enero	10%	01-ene-22
	Febrero	10%	01-feb-22
	Marzo	10%	01-mar-22
		6%	24-mar-22
2022	Abril	6%	01-abr-22
	Mayo	6%	01-may-22
	Junio	6%	01-jun-22
	Julio	6%	01-jul-22
		3%	04-jul-22
	Agosto	3%	01-ago-22
		8%	29-ago-22
	Septiembre	8%	01-sept-22
		12%	09-sept-22
		14%	21-sept-22
	Octubre	14%	01-oct-22
		18%	03-oct-22
		20%	14-oct-22
		24%	18-oct-22
		28%	24-oct-22
		35%	25-oct-22
		40%	26-oct-22
	Noviembre	40%	01-nov-22
		45%	04-nov-22
		40%	15-nov-22
		35%	23-nov-22
		30%	29-nov-22
	Diciembre	30%	01-dic-22
		28%	05-dic-22
		25%	29-dic-22



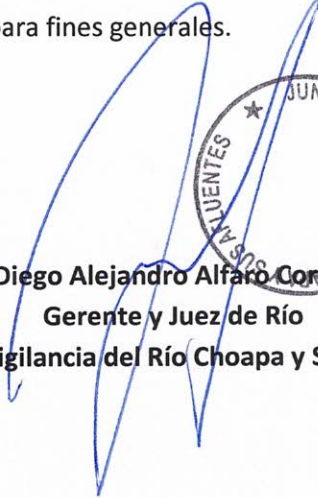
Dimensiones:
✓ Desarrollo Organizacional
✓ Administración Financiera
✓ Operaciones Hídricas
✓ Vinculación

2023	Enero	25%	01-ene-23
	Febrero	25%	01-feb-23
		20%	03-feb-23
	Marzo	20%	01-mar-23
		18%	17-mar-23
	Abril	18%	01-abr-23
	Mayo	18%	01-may-23
		15%	02-may-23
		10%	29-may-23
	Junio	10%	01-jun-23
	Julio	10%	01-jul-23
	Agosto	10%	01-ago-23
	Septiembre	10%	01-sept-23
		13%	19-sept-23
	Octubre	13%	01-oct-23
		17%	02-oct-23
		20%	17-oct-23
		25%	19-oct-23
		30%	23-oct-23
	Noviembre	30%	01-nov-23
		35%	22-nov-23
	Diciembre	35%	01-dic-23
		30%	05-dic-23
		25%	22-dic-23
2024	Enero	25%	01-ene-24
		20%	18-ene-24
	Febrero	20%	01-feb-24
	Marzo	20%	01-mar-24
		18%	18-mar-24
	Abril	18%	01-abr-24
	Mayo	18%	01-may-24
		15%	03-may-24
		10%	08-may-24
	Junio	10%	01-jun-23
	Julio	10%	01-jul-24
	Agosto	10%	01-ago-24
		20%	10-ago-24
	Septiembre	20%	01-sept-24
		35%	12-sept-24
	Octubre	35%	01-oct-24
		60%	09-oct-24
		80%	11-oct-24
		100%	15-oct-24
	Noviembre	100%	01-nov-24
	Diciembre	100%	01-nov-24
		75%	31-dic-24



2025	Enero	75%	01-ene-25
		50%	07-ene-25
		35%	31-ene-25
	Febrero	35%	01-feb-25
		40%	14-feb-25
	Marzo	40%	01-mar-25
	Abril	40%	01-abr-25
		30%	14-abr-25
	Mayo	30%	01-may-25
		25%	09-may-25
	Junio	25%	01-jun-25
		20%	09-jun-25
	Julio	20%	01-jul-25
		12%	23-jul-25
	Agosto	12%	01-ago-25
	Septiembre	12%	01-sept-25
		20%	12-sept-25
		25%	25-sept-25
		30%	30-sept-25
	Octubre	30%	01-oct-25
		35%	02-oct-25
		40%	13-oct-25
		45%	15-oct-25
	Noviembre	45%	01-nov-25
		40%	10-nov-25
		35%	17-nov-25
	Diciembre	35%	01-dic-25
		30%	22-dic-25

Se extiende el presente certificado para fines generales.



Diego Alejandro Alfaro Cortes
Gerente y Juez de Río
Junta de Vigilancia del Río Choapa y Sus Afluentes

DAAC/jly

C.c.: - Archivo

ANEXO 4



ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS ACTUALIZADOS

DATOS DE ENTRADA	
Distancia Centro abastecimiento	30 (km)
ZONA EXTREMA (≥ 3000 MSNM) Y/O ZONAS MINERAS	SI
Acceso	Ladera Media
Altura (m.s.n.m.)	≤ 1000 m.s.n.m.

ITEM	PRECIO		
	UNIDAD	Mínimo	Máximo
MEJORAMIENTO DE ACCESO	m	\$ 6,199	\$ 6,432
ROCE	m ²	\$ 1,616	\$ 1,747
EMPLANTILLADO (4 SACOS/m3) :	m ³	\$ 113,820	\$ 120,046
HORMIGÓN G17 (In Situ)	m ³	\$ 169,591	\$ 177,999
HORMIGÓN G20 (In Situ)	m ³	\$ 175,660	\$ 182,949
HORMIGÓN G25 (In Situ)	m ³	\$ 182,908	\$ 191,598
ACERO A - 44 - 28 Ø 8 - Ø 10 mm	kg	\$ 2,838	\$ 2,948
ACERO A - 44 - 28 Ø 12 mm	kg	\$ 3,002	\$ 3,121
ACERO A - 44 - 28 Ø 18 mm	kg	\$ 3,604	\$ 3,759
ACERO A - 44 - 28 Ø 22 mm	kg	\$ 3,974	\$ 4,151
ACERO A - 63-42 Ø 8 - Ø 10 mm	kg	\$ 3,002	\$ 3,130
ACERO A - 63-42 Ø 12 mm	kg	\$ 3,097	\$ 3,230
ACERO A - 63-42 Ø 18 mm	kg	\$ 3,604	\$ 3,767
ACERO A - 63-42 Ø 22 mm	kg	\$ 3,974	\$ 4,159
MALLA ACMA C-92 (2,6 x 5 m)	m ²	\$ 4,194	\$ 4,429
MALLA ACMA C-139 (2,6 x 5 m)	m ²	\$ 5,139	\$ 5,380
MALLA ACMA C-188 (2,6 x 5 m)	m ²	\$ 6,276	\$ 6,668
MALLA ACMA C-196 (2,6 x 5 m)	m ²	\$ 7,246	\$ 7,620
MALLA ACMA C-257 (2,6 x 5 m)	m ²	\$ 8,384	\$ 8,666
MOLDAJE TABLERO 15mm (3 USOS) MUROS (inc. Colocación y descimbre)	m ²	\$ 12,680	\$ 13,603
MOLDAJE TABLERO 15mm (1 USO) MUROS (inc. Colocación y descimbre)	m ²	\$ 19,043	\$ 20,332
CINTA PVC 0-15 CL	m	\$ 15,097	\$ 19,993
CINTA PVC 0-22 CL	m	\$ 16,937	\$ 22,135
BARBACANAS	unidad	\$ 5,301	\$ 5,647
DREN LONGITUDINAL	m	\$ 7,878	\$ 8,309
EXCAVACION CON MAQUINA	m ³	\$ 3,761	\$ 4,057
EXCAVACION A MANO (terreno semi-blando)	m ³	\$ 14,147	\$ 15,259
EXCAVACION A MANO (terreno Semi-Duro)	m ³	\$ 25,465	\$ 27,466
RELLENO COMÚN (COMPACTACIÓN SIMPLE)	m ³	\$ 8,317	\$ 8,968
RELLENO ESTRUCTURAL MANUAL POR CAPAS**	m ³	\$ 27,722	\$ 29,892
MEJORAMIENTO BASE CON GRAVILLA 3/4	m ³	\$ 43,865	\$ 46,206
ESCARPE CON MAQUINA	m ³	\$ 1,014	\$ 1,140
SELECCION MATERIAL Y ACOPIO PARA DE TERRAPLENES:	m ³	\$ 3,996	\$ 4,303
COLOCACION Y DIST. DE MATERIAL PARA TERRAPLENES CON BULLDOZER	m ³	\$ 1,808	\$ 2,030
COMPACTACION RODILLADA DE TERRAPLENES POR CAPAS CONTROLADAS	m ³	\$ 1,544	\$ 1,614
TRANSPORTE A BOTADERO (por kilómetro)	m ³	\$ 601	\$ 645
MANEJO DE BOTADERO	m ³	\$ 2,421	\$ 2,811

*Considera todo el territorio nacional** Sólo obras de arte

ANEXO ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ANEXO 5

SÍNTESIS TÉCNICA — 15 TRANQUES LATERALES DEL CANAL BUZETA

Numeración y datos técnicos gobernados por HEC-RAS; coordenadas UTM asociadas desde el KMZ sin utilizar su numeración como identificador del tranque.

N.º de tranques	Volumen acumulado total (m³)	Movimiento total de tierra (m³)	Cumplen volumen <150.000 m³
15	956,282	1,253,734	15
Impulsión en entrada	Impulsión en salida	Entrada y salida	No requiere elevación
9	8	3	1

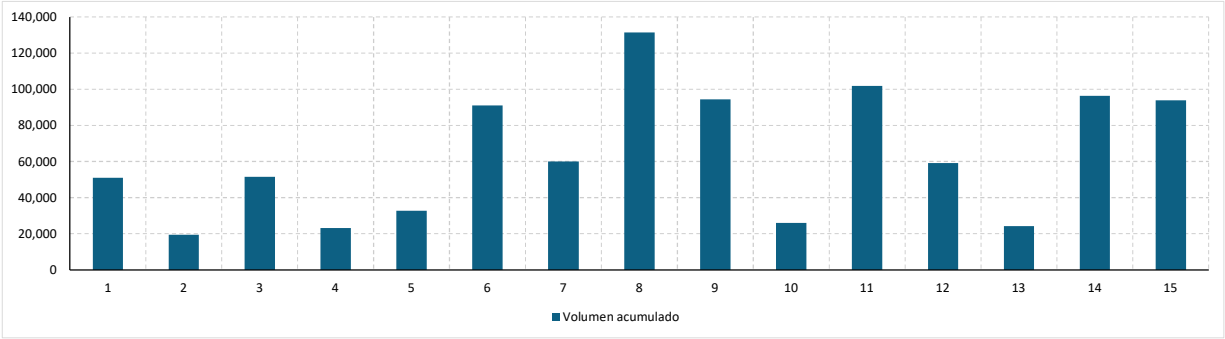
CRITERIO DE ASOCIACIÓN Y CONTROL

La numeración oficial se mantiene del Tranque 1 al 15 según la planilla HEC-RAS. Los números de los polígonos KMZ no se usan para reenumerar los tranques.

La geometría denominada polígono 14 queda como elemento adicional cercano al Tranque 13. No se considera un Tranque 16 ni desplaza la numeración técnica.

El Tranque 14 conserva íntegramente sus datos HEC-RAS, volúmenes y necesidad de impulsión; su coordenada se asocia provisionalmente al polígono 15 y debe verificarse en terreno/topografía.

Sector	N.º de tranques	Volumen acumulado (m³)
El Tambo	5	177,745
Colliguay	2	151,147
Tahuinco	4	353,702
Limáhuida / Los Loros / Socavón	1	59,158
Cañas I y II	3	214,530





Reporte
Generación Eléctrica Fotovoltaica



fcfm

Geofísica

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Ministerio de
Energía

Gobierno de Chile



EXPLORADOR SOLAR

Reporte Recurso Solar y datos meteorológicos



fcfm

Geofísica

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

