



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ICS1113 - OPTIMIZACIÓN

Entrega 3

19 de junio de 2025

1º semestre 2025 - Profesores M. Castro - R. Cuadrado - C. Balbontín - G.
Pérez
Grupo 77

Integrantes:

Paula Astorga Montecino
Ethan Orellana Torres
Javiera Painemil Briones
Maximiliano Pisfil Muñoz
Maximiliano Berríos Díaz
Constanza Sepúlveda Abarzúa

Índice

1. Definición del problema	3
1.1. Introducción a la problemática	3
1.2. Valor potencial de resolver el problema	3
1.3. Objetivos del tomador de decisiones	4
2. Modelo Propuesto	5
3. Análisis de un sector de la problemática, Complejidad y Factibilidad de Resolución	8
4. Definición de Datos	8
5. Resolución de la problemática	10
6. Validación del Resultado	11
7. Análisis de sensibilidad	11
8. Anexos	15

1. Definición del problema

1.1. Introducción a la problemática

El norte de Chile enfrenta una crisis hídrica por la baja de precipitaciones, el cambio climático, la alta demanda y la sobreexplotación de acuíferos. En este contexto, la Provincia del Choapa, en la Región de Coquimbo, destaca como uno de los territorios más afectados del país registrando más de una década de déficit hídrico severo [1]. Comunas como **Illapel, Salamanca, Los Vilos y Canela** son especialmente vulnerables, sobre todo en zonas rurales donde el agua proviene de fuentes subterráneas y Sistemas de Agua Potable Rural (APR), los cuales en muchos casos están sobreexigidos o presentan riesgo de agotamiento [2].

Desde un enfoque humanitario básico, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un mínimo de **100 litros de agua diarios por persona** para garantizar condiciones de higiene, salud y alimentación. No obstante, en la provincia de Choapa, este umbral frecuentemente no se alcanza [4]. En sectores rurales abastecidos por APR, el suministro de agua oscila entre **40 y 50 litros por persona al día**, y en situaciones de emergencia puede descender por debajo de los **20 litros**, generando condiciones precarias para la salud y el bienestar de las comunidades [4][5].

La brecha entre las necesidades básicas y la disponibilidad real de agua persiste por desafíos como la falta de infraestructura moderna, pérdidas en redes [3], planificación territorial fragmentada, baja coordinación institucional [6] y limitada capacidad técnica y financiera de los comités APR rurales [2].

Frente a esta situación, el tomador de decisiones sería una institución designada por el Estado chileno, con competencia directa en la planificación y gestión de recursos hídricos, especialmente en lo relativo a infraestructura de distribución y eficiencia operacional. Esto incluye organismos como el Gobierno Regional de Coquimbo, el Ministerio de Obras Públicas (a través de la Dirección de Obras Hidráulicas), o entidades técnicas con participación pública o mixta que tengan como propósito mejorar el servicio de provisión de agua. Estas entidades son clave para enfrentar la escasez hídrica, cuya causa principal es la mala gestión del recurso [7]. Mejorar dicha gestión permitiría no solo reducir pérdidas, sino también anticiparse a escenarios futuros de escasez, cubriendo de manera más eficiente la creciente demanda hídrica, particularmente en regiones del norte como Coquimbo. El horizonte de planificación sugerido es de **1 año**, adecuado para evaluar la implementación de intervenciones de mediano plazo con impacto en la eficiencia del sistema.

1.2. Valor potencial de resolver el problema

Aplicar un modelo de optimización que reduzca pérdidas en fuentes, cañerías y su transporte entre terrenos puede mejorar significativamente la eficiencia del sistema. En territorios rurales como la Provincia de Choapa, donde la infraestructura es limitada y el recurso escaso, se estima que puede recuperarse entre un 15 % y un 30 % del recurso perdido por ineficiencias [6]. De hecho, sobre un volumen distribuido anual estimado entre 1,3 y 1,65 millones de metros cúbicos, el modelo permitiría recuperar entre 99.300 y 248.250 m³ de agua al año mediante mejoras en la infraestructura.

Desde el plano **económico**, optimizar la ubicación de fuentes y conexiones dentro de la provincia permite reducir gastos en soluciones de emergencia como el uso de camiones aljibe, los cuales representan más de **\$12.000 millones anuales** en las regiones del norte [5]. Esto libera recursos para inversiones estructurales más sostenibles y duraderas en comunas como **Illapel, Salamanca o Canela**.

En términos **sociales**, el modelo permite identificar comunas dentro de Choapa con mayor déficit hídrico y orientar allí las decisiones de infraestructura, mejorando el acceso al recurso y abordando desigualdades territoriales.

Desde una dimensión **ambiental**, reducir pérdidas ayuda a satisfacer la demanda sin aumentar la extracción desde fuentes subterráneas ya sobreexplotadas, como los acuíferos de **Illapel o Quilimarí** [4]. Así, se protege la regeneración del ecosistema hídrico local. En conjunto, el modelo contribuye a una gestión más eficiente, equitativa y sostenible del agua en la Provincia de Choapa.

1.3. Objetivos del tomador de decisiones

Ante la escasez hídrica y fallas en la infraestructura en la Provincia de Choapa, se propone un modelo de optimización para **minimizar las pérdidas de agua** en fuentes y cañerías, mejorando la eficiencia y equidad en su distribución comunal.

El modelo asume que los terrenos comunales pueden demandar o proveer agua según su función. En los casos en que operan como oferentes, se consideran cinco tipos de fuentes: plantas desalinizadoras, plantas de tratamiento de aguas grises, pozos, tranques y ríos. Sobre esta base, el tomador de decisiones debe definir el flujo de agua en cada cañería activa por periodo, modelado mediante la variable continua $Y_{a,s,t}[m^3]$, que representa el caudal de agua que fluye por la cañería a en la comuna s durante el periodo t . Esto permite distribuir el recurso desde las fuentes hacia los terrenos con demanda, considerando las pérdidas asociadas al transporte. Las pérdidas están representadas en el parámetro $\alpha_{a,s}$, que corresponde al porcentaje de pérdida de cada cañería en una comuna. A partir de lo anterior, el transporte del agua puede definir si se construye una nueva cañería previamente identificada como viable en el conjunto de posibles ubicaciones para las cañerías. Esto se modela con la variable binaria $Q_{a,s,t}$, que indica si la cañerías instalada en el sector s en el periodo t . Finalmente, se contempla la opción de agregar nuevas fuentes en terrenos que no contaban previamente con ellas, lo cual se representa mediante la variable $W_{f,n,s,t}$. Para asegurar que las decisiones sean factibles en la práctica, el modelo incorpora un conjunto de restricciones fundamentales. Para asegurar que las decisiones sean factibles en la práctica, el modelo incorpora un conjunto de restricciones fundamentales.

Para cumplir el objetivo del modelo, se establece una restricción que equilibre el agua aportada por fuentes y cañerías con la demanda local, considerando pérdidas por transporte y eficiencia. Esta condición asegura una distribución viable y cumple con el principio de conservación del flujo en cada nodo. Por otro lado, el resto de las restricciones abordan aspectos operacionales esenciales la capacidad máxima de cañerías (R2) y su activación (R3); la limitación de construcciones (R4 y R5) para evitar múltiples compras o duplicaciones; la operación sujeta a la instalación y del estado físico (R6 a R8); y el control del estado financiero mediante reglas de flujo de caja (R9–R11). Además, se considera la acumulación de fuentes (R12), la incompatibilidad entre operación y falla (R13–R14), y el límite de fuentes por

terreno (R15). Todas estas restricciones permiten que el modelo represente con fidelidad la complejidad técnica y presupuestaria de una red de distribución hídrica eficiente y sostenible.

2. Modelo Propuesto

Conjuntos

- S : Conjunto de comunas de la provincia tanto tanto en coquimbo.
- $T = \{1, \dots, t_f\}$: Conjunto de t_f semanas.
- N_s : Conjunto de terrenos de una comuna $s \in S$.
- F : Conjunto de los distintos tipos de fuentes que proporcionan agua.
- $A_s \subseteq N_s \times N_s$: Conjunto de posibles cañerías donde se pueden conectar pares de terrenos dentro de la misma comuna $s \in S$.
- $\delta^-(i)$: Conjunto de cañerías que llegan al terreno i , es decir, $\delta^-(i) = \{(j, i) \in A_s \mid j \in N_s\}$ en la comuna $s \in S$.
- $\delta^+(i)$: Conjunto de cañerías que salen del terreno i , es decir, $\delta^+(i) = \{(i, j) \in A_s \mid j \in N_s\}$ en la comuna $s \in S$.

Parámetros

- $d_{n,s,t}$: Demanda de flujo de agua en cada terreno $n \in N_s$ perteneciente a la comuna $s \in S$ en el tiempo $t \in T$ [m^3/s].
- $k_{a,s}$: Capacidad máxima del flujo de agua de cada cañería $a \in A_s$ del comuna $s \in S$ [m^3/s].
- m_f : Cantidad de flujo agua que puede suministrar la fuente $f \in F$ [m^3/s].
- $\alpha_{a,s}$: Porcentaje de pérdida asociado a la cañería $a \in A_s$ en un comuna $s \in S$.
- β_f : Porcentaje de perdida asociado a la fuente $f \in F$.
- $c_{f,s}$: Costo asociado a construir una fuente $f \in F$ en la comuna $s \in S$ [CLP].
- $c'_{a,s}$: Costo asociado a instalar una cañería $a \in A_s$ en la comuna $s \in S$ [CLP].
- $c''_{a,s}$: Costo asociado a arreglar una cañería $a \in A_s$ en la comuna $s \in S$ [CLP].
- I_0 : Presupuesto de inicio en el periodo $t = 1$
- e_t : Dinero recibido por demanda en [$CLP \cdot s/m^3$].
- $g_{f,n,s}$: Máximo de fuentes de tipo $f \in F$ construidas en un terreno $n \in N_s$ en un comuna $s \in S$.
- φ : Cantidad de periodos máximos en los cuales puede estar una cañería sin mantención antes de presentar fallas.

Variables

- $W_{f,n,s,t}$: Número de fuentes nuevas construidas del tipo $f \in F$ en el terreno $n \in N_s$, en la comuna $s \in S$ en el tiempo $t \in T$.
- $X_{f,n,s,t}$: Número total de fuentes instaladas del tipo $f \in F$ en el terreno $n \in N_s$, en la comuna $s \in S$ en el tiempo $t \in T$.
- $Y_{a,s,t}$: Flujo de agua que fluye a través de la cañería $a \in A_s$ en la comuna $s \in S$ en el periodo $t \in T$ [m^3].
- P_t : Dinero al **final** del período $t \in T$.
- $Q_{a,s,t} = \begin{cases} 1 & \text{Se construye la cañería } a \in A_s \text{ en la comuna } s \in S \text{ en el período } t \in T \\ 0 & \text{E.O.C.} \end{cases}$
- $R_{a,s,t} = \begin{cases} 1 & \text{Está operando la cañería } a \in A_s \text{ en la comuna } s \in S \text{ en el período } t \in T \\ 0 & \text{E.O.C.} \end{cases}$
- $L_{a,s,t} = \begin{cases} 1 & \text{Se realiza **mantención** a la cañería } a \in A_s \text{ en la comuna } s \in S \text{ en el período } t \in T \\ 0 & \text{E.O.C.} \end{cases}$
- $V_{a,s,t} = \begin{cases} 1 & \text{Se encuentra **instalada** la cañería } a \in A_s \text{ en la comuna } s \in S \text{ en el período } t \in T \\ 0 & \text{E.O.C.} \end{cases}$
- $U_{a,s,t} = \begin{cases} 1 & \text{Se encuentra **rota** la cañería } a \in A_s \text{ en la comuna } s \in S \text{ en el período } t \in T \\ 0 & \text{E.O.C.} \end{cases}$

Función objetivo

Minimizar la perdida de agua de cada cañería y de cada fuente en cada comuna de la provincia de Choapa. Considera la perdida asociada por una cañería funcionando y la perdida asociada por el tipo de fuente decidida.

$$\min \left(\sum_{t \in T} \sum_{a \in A_s} \sum_{s \in S} \alpha_{a,s} \cdot Y_{a,s,t} + \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} \beta_f \cdot m_f \cdot X_{f,n,s,t} \right)$$

Restricciones

R1: **Ecuación de flujo** El balance de flujo equilibra el aporte de las fuentes y las cañerías entrantes con las salidas, incorporando las pérdidas asociadas a las fuentes y al desgaste de las cañerías.

$$\sum_{f \in F} (1 - \beta_f) m_f X_{f,n,s,t} + \sum_{a \in \delta^-(n)} Y_{a,s,t} - \sum_{a \in \delta^+(n)} (1 - \alpha_{a,s}) Y_{a,s,t} = d_{n,s,t}$$

$$\forall n \in N_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

R2: **Capacidad máxima de flujo:** El flujo de agua en la cañería a en la comuna s es máximo k cuando la cañería a existe, es nula en otro caso.

$$Y_{a,s,t} \leq k_{a,s} \cdot R_{a,s,t} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

R3: **Activación de cañería:** Solo es posible instalar una vez una cañería:

$$\sum_{t \in T} Q_{a,s,t} \leq 1 \quad \forall a \in A_s \quad \forall s \in S$$

R4: **Cañería previamente instalada, sigue instalada:** Si se instala, entonces queda marcada como que se instaló para todos los próximos períodos:

$$Q_{a,s,t} \leq V_{a,s,t} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,s,t} \leq V_{a,s,t+1} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in \{1, \dots, t_f - 1\}$$

Si una cañería es construida por lo tanto es instalada.

$$V_{a,s,t} \leq Q_{a,s,t} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

Una cañería solo puede estar instalada si fue construida.

$$V_{a,s,t} \leq Q_{a,s,t} + V_{a,s,t-1} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in \{1, \dots, t_f\}$$

R5: **Persistencia del estado de falla:** Si una cañería está rota y no se repara, permanece rota al siguiente período:

$$U_{a,s,t+1} \geq U_{a,s,t} - L_{a,s,t} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in \{1, \dots, t_f - 1\}$$

R6: **Condición de ruptura de cañería:** Si no se repara una cañería en φ períodos consecutivos, esta se rompe automáticamente:

$$U_{a,s,t+\varphi} \geq R_{a,s,t} - \sum_{\tau=t}^{t+\varphi} L_{a,s,\tau} \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in \{1, \dots, t_f - \varphi\}$$

R7: **Flujo de caja — periodo inicial:** Se calcula el dinero al final del primer período. **No incluye costos de reparación**, ya que en la primera semana no es posible reparar. La demanda se asume cumplida en función de lo construido ese mismo período.

$$I_0 - \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} c'_{a,s} \cdot Q_{a,s,1} - \sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} \sum_{f \in F} c_{f,s} \cdot W_{f,n,s,1} + e_1 \cdot \sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} d_{n,s,1} = P_1$$

R8: **Flujo de caja — para todo período $t \in \{2, \dots, n\}$:** Se actualiza el presupuesto en cada período: se suma lo recibido por demanda cumplida y se restan costos de nuevas instalaciones y reparaciones.

$$P_{t-1} + e_t \cdot \sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} d_{n,s,t} - \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} c'_{a,s} \cdot Q_{a,s,t} - \sum_{s \in S} \sum_{n \in N_s} \sum_{f \in F} c_{f,s} \cdot W_{f,n,s,t} - \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_s} c''_{a,s} \cdot L_{a,s,t} = P_t$$

$$\forall t \in \{2, \dots, t_f\}$$

R9: **No se permite saldo negativo:** El dinero al final de cada semana debe ser positivo:

$$P_t \geq 0 \quad \forall t \in T$$

R10: **Acumulación de fuentes instaladas:**

$$\text{Caso Base: } X_{f,n,s,1} = W_{f,n,s,1}$$

El total de fuentes instaladas es la suma de las nuevas fuentes más las antiguas:

$$X_{f,n,s,t} = W_{f,n,s,t} + X_{f,n,s,t-1} \quad \forall f \in F, \forall n \in N_s, \forall s \in S, \forall t \in (2, \dots, t_f)$$

R11: **Una cañería rota no esta operando:** Sólo puede operar una cañería siempre que no este rota.

$$U_{a,s,t} + R_{a,s,t} \leq 1 \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

R12: **Arreglar una cañería:** Si una cañería rota se arregla, deja de estar rota en la misma semana.

$$L_{a,s,t} + U_{a,s,t} \leq 1 \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

R13: **Fuentes máximas por terreno:** El numero de fuentes $X_{f,n,s,t}$ en un terreno $n \in N$ no puede superar su limite

$$X_{f,n,s,t} \leq g_{f,n,s} \quad \forall f \in F, \forall n \in N_s, \forall s \in S, \forall t \in T$$

Naturaleza de las variables:

- $Q_{a,s,t}, R_{a,s,t}, L_{a,s,t}, U_{a,s,t}, V_{a,s,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$
- $W_{f,n,s,t}, X_{f,n,s,t} \in \mathbb{Z} \geq 0, \quad \forall f \in F, \forall n \in N_s, \forall s \in S, \forall t \in T$
- $Y_{a,s,t} \geq 0, \quad \forall a \in A_s, \forall s \in S, \forall t \in T$
- $P_t \geq 0, \quad \forall t \in T$

3. Análisis de un sector de la problemática, Complejidad y Factibilidad de Resolución

Como se muestra en la figura 1 (ver Anexo) se analiza la Provincia del Choapa (Región de Coquimbo), específicamente la comuna de Andacollo, como caso factible para resolver la problemática principal de esta comuna, dado su nivel de vulnerabilidad y la dependencia crítica de fuentes de agua limitadas. El modelo desarrollado se basa en supuestos fundamentados, permitiendo representar de forma simplificada pero realista la situación actual de abastecimiento, representando una red compuesta por aproximadamente 78 nodos correspondientes a terrenos de viviendas. Esta delimitación permite un balance adecuado entre la complejidad del sistema y la viabilidad computacional para su análisis.

La complejidad del modelo radica en las múltiples decisiones interrelacionadas, como la selección de fuentes, rutas de distribución y minimización de pérdidas, que impiden resolver el problema por inspección visual o métodos simples. Este modelo está diseñado para apoyar a entidades como el Ministerio de Obras Públicas o comités APR, facilitando decisiones estratégicas que mejoren la eficiencia del suministro de agua rural y mitiguen la crisis hídrica, con un impacto social tangible.

4. Definición de Datos

Definición de los parámetros m_f y $c_{f,s}$

Para establecer valores realistas del parámetro m_f , que representa el caudal de agua en m^3 /semana que puede entregar cada fuente, se investigaron distintas tecnologías implementadas

en la provincia de Choapa o regiones comparables. En el caso de las plantas desalinizadoras, se utilizó la Planta de Minera Los Pelambres ubicada en Los Vilos, que entrega un caudal de 241 920 m³/semana [8]. Para las plantas de tratamiento de aguas grises domiciliarias, se consideró una unidad de 9,44 m³/semana [9]. El caudal de un pozo de 8 m de profundidad fue estimado en 604,80 m³/semana [10], mientras que el suministro de un tranque se calculó dividiendo un volumen total de 63 000 m³ extraído en 15 días, resultando en 7 502 m³/semana [11]. Finalmente, la captación desde el río Choapa se basó en su caudal medio anual estimado en 5 091 456 m³/semana [12].

El costo de construcción $c_{f,s}$, expresado en CLP, se definió según registros de proveedores y entidades públicas. La planta desaladora de Los Pelambres tuvo un costo de \$2 070 000 000 000 CLP [8]. La planta de aguas grises domiciliaria fue valorada en \$1 460 506 CLP [9], mientras que el pozo de 8 m presentó un costo de \$1 200 000 CLP [10]. El tranque Las Tupas fue construido por un valor total estimado de \$109 140 000 CLP [11], y en el caso de la captación de agua desde el río, no se consideró un costo de inversión fija sino un costo operacional variable estimado de \$200 CLP por m³ tratado [12].

Definición del parámetro $d_{n,s,t}$

Para estimar $d_{n,s,t}$, demanda de agua de un terreno, se usó el consumo promedio según el tipo de establecimiento. Las familias rurales demandan 4,2 m³/semana por vivienda [13]. En centros educativos, el consumo se calculó considerando 30 estudiantes por curso, con 44 L diarios por estudiante, lo que equivale a 9,24 m³/semana [14, 15]. Para centros de salud se utilizaron 132 camas por cada 100 000 habitantes y un consumo de 50 L diarios por paciente, lo que da 46,2 m³/semana por establecimiento [16, 17]. En cuanto a municipalidades, se estimaron 250 funcionarios por edificio, con 100 L diarios por persona, resultando en 175 m³/semana [18, 19]. Para pequeños agricultores, se utilizaron 1,9 hectáreas por usuario y una demanda de 6,2 m³/día por hectárea, lo que implica 82,46 m³/semana [20, 21]. Se excluyeron sectores industriales, turísticos y minería por alta variabilidad y baja representatividad territorial [22, 23, 24].

Definición de los parámetros $k_{a,s}$ y $\alpha_{a,s}$

La capacidad máxima $k_{a,s}$ se estimó promediando el caudal de cinco tuberías comunes en redes de distribución de agua potable, usando como referencia una de 200 mm se obtuvo 5,746 m³/semana [25]. El porcentaje de pérdida asociado a una cañería $\alpha_{a,s}$ se fijó en 8 %, tomando como base el hecho de que las pérdidas físicas reales representan el 25 % del total del 33 % de agua no facturada en Chile [26, 27].

Definición del parámetro β_f

El porcentaje de pérdida β_f asociado a cada fuente se estableció como sigue: 10 % para plantas desaladoras [28], 4 % para aguas grises [9], 6 % para pozos [27], 17 % para tranques [29] y 11 % para captaciones desde río [30].

Definición del parámetro $c'_{a,s}$, $c''_{a,s}$ y φ

Para definir $c'_{a,s}$, costo de instalación, se usaron tuberías HDPE, material comúnmente usado en sistemas rurales de agua potable, que son de 200 mm y 6,096 m, con un precio de \$76 990 CLP. Así, se obtiene que el costo de la cañería por metro lineal es de \$12 629,6 CLP/m [31]. Además, la mano de obra promedio por un servicio de gasfiter es de \$43 000 CLP [32]. El largo promedio de una cañería es de 15 metros [33], por lo que consideramos este dato para calcular la mano de obra por instalar una cañería promedio por metro lineal es de \$2 866,7 CLP/m. El parámetro $c'_{a,s}$ es de \$15 496 CLP/m, mientras que $c''_{a,s}$, el costo de reparación de cañerías, se estimó en \$47 500 CLP, basado en costos promedio de mantenimiento de cañería como limpieza y reparación [34, 35]. Finalmente, para el parámetro φ , que representa la duración máxima sin mantención antes de una falla, se consideró un período de 70 semanas, dado que la vida útil de las cañerías es extendida y expertos recomiendan un chequeo anual [36].

Definición del parámetro I_0 (CLP)

El parámetro I_0 se relaciona con el presupuesto regional que es de \$2 640 millones. Este valor se obtuvo de la reasignación presupuestaria dentro del Plan de Emergencia Hídrica 2024 en la región de Coquimbo [37].

Definición del parámetro e_t (CLP·s/m³)

Este parámetro se relaciona con el dinero que se recibe al satisfacer la demanda de los diferentes nodos. Para obtener este valor, se utilizó el dato del costo por m³ de agua que proporcionan las boletas de Aguas Andinas (1282 CLP/m³) [38]. Luego, se obtuvo el dato del caudal de Aguas Andinas, que corresponde a 20 784 768 m³/semana [39]; de esto se calculó el tiempo. De esta manera se obtuvo que el dinero recibido es de \$38,46 CLP·s/m³. Se optó por utilizar como referencia a la empresa Aguas Andinas, ya que las distribuidoras de agua del norte de Chile no cuentan con todos los datos necesarios para calcular estos parámetros. En el futuro, sería recomendable establecer colaboraciones con estas empresas para acceder a información más completa y precisa.

5. Resolución de la problemática

La resolución del modelo se realiza usando GUROBI a través de python mediante librerías. El programa se encuentra dentro de un archivo main.py que está estructurado en las siguientes secciones : 1. Lectura y carga de datos, 2. Módulo de pruebas, 3. Construcción del modelo, 4. Resolución del modelo, 5. Impresión y guardado de resultados. La primera sección lee y carga los datos de los parámetros desde los .csv, para ser utilizados luego por el modelo. La sección de pruebas es para probar las salidas de las funciones auxiliares definidas para acceder a los parámetros. En la construcción del modelo se definen los conjuntos de la problemática: terrenos , cañerías, comunas, semanas, entre otros. Recorriendo estos conjuntos es como se construyen las variables. Una vez definidas las variables, se continúa con la definición de las restricciones del modelo presentado. El módulo de resolución, analiza si el modelo actual posee o no solución optima, si es infactible, o no acotado. Finalmente el módulo de impresión

de resultados muestra los resultados obtenidos tanto como de valor objetivo y el conjunto solución de las variables que se desee visualizar. Además se crean archivos .csv de las variables de la solución.

6. Validación del Resultado

El modelo de optimización presentado resultó factible para el tiempo de una semana, y tiene como solución óptima 10943789.09217391, mientras que el valor óptimo están en archivos csv dentro de las carpetas. Esto quiere decir que se logra reducir en gran medida las pérdidas de agua asociadas a la mala gestión.

7. Análisis de sensibilidad

Referencias

- [1] Ministerio de Obras Públicas. (2024, agosto 27). *Decreto N° 94: Declara zona de escasez hídrica a la provincia de Choapa*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://c.bcn.cl/3tae0>
- [2] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2020). *Plan estratégico de gestión hídrica cuenca del Choapa*. Biblioteca Digital CIREN. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/29127>
- [3] Organización Mundial de la Salud. (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. WHO Press. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67884>
- [4] Dirección General de Aguas. (2017). *Inventario nacional de acuíferos*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/5c705214-8f97-4b8d-9b14-35f0fc3c1362>
- [5] Dirección de Presupuestos. (2022). *Gasto en emergencias hídricas en regiones afectadas por sequía*. Ministerio de Hacienda, Gobierno de Chile. https://www.dipres.gob.cl/597/articles-141155_informe_final.pdf
- [6] OECD. (2015). *Water Governance in Chile: Acknowledging Fragmentation, Promoting Integration*. OECD Studies on Water. <https://doi.org/10.1787/9789264230740en>
- [7] País Circular. (2019, septiembre 18). *El drama del agua en Chile: ineficiencia en la gestión es uno de los principales factores de la escasez hídrica*. <https://www.paiscircular.cl/reportajes/el-drama-del-agua-en-chile/>
- [8] Minera Los Pelambres. (2024, marzo 21). *Los Pelambres pone en marcha primera planta desalinizadora para la minería de la zona central*. <https://www.aminerals.cl/centro-de-informacion/2024/03/21/los-pelambres-pone-en-marcha-primera-planta-desalinizadora-para-la-mineria-de-la-zona-central>
- [9] Aguasol. (s.f.). *Planta de tratamiento de aguas grises 1.350L 0.75HP*. <https://aguasol.cl/servicio/planta-de-tratamiento-de-aguas-grises-1-350l-075hp/>
- [10] Pozo Biobío. (2025, abril 16). *¿Cuánto cuesta hacer un pozo profundo?* <https://www.pozosbiobio.cl/2025/04/16/cuanto-cuesta-hacer-un-pozo-profundo/>
- [11] Minera Los Pelambres. (2025, febrero 12). *Con entrega de tranque Las Tupas...* <https://web.pelambres.cl/noticias-detalle/2025/02/12/con-entrega-de-tranque-las-tupas-agricultores-de-salamanca-e-illapel-recuperan-63-m3-de-agua-para-riego>
- [12] Wikipedia. (s.f.). *Río Choapa*. https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Choapa

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [13] Scielo Chile. (2022). *Acceso y uso del agua potable en zonas rurales*. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34022022000200375&script=sci_arttext
- [14] Fundación Amulén. (2021). *Educación sin agua*. https://www.fundacionamulen.cl/wp-content/uploads/2021/12/Educacion-Sin-Agua_compressed.pdf
- [15] Centro de Estudios MINEDUC. (2020). *Indicador: Estudiantes por curso, 2010-2019*. <https://centroestudios.mineduc.cl/wp-content/uploads/sites/100/2020/11/Indicador-estudiantes-por-curso-2010-2019-1.xlsx>
- [16] ISID. (s.f.). *Guía de higiene de manos*. <https://isid.org/guia/prevencion/higienemanos-2/>
- [17] La Tercera. (s.f.). *El mapa actualizado de las camas de hospitales en Chile*. <https://www.latercera.com/nacional/noticia/el-mapa-actualizado-de-las-camas-de-hospitales-en-chile/YYE3AV3SJ5DBTDI7QSDY4V2E2Y/>
- [18] Dirección del Trabajo. (s.f.). *Estadísticas laborales del sector público*. <https://www.dt.gob.cl/portal/1628/w3-article-60435.html>
- [19] AMUCH. (2022). *Capital humano municipal*. <https://amuch.cl/wp-content/uploads/2022/05/Capital-Humano-1.pdf>
- [20] CIREN. (s.f.). *Consumo de agua en agricultura*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/8b017969-a689-4f1d-b749-6129067d18b4/content>
- [21] INE. (2021). *Censo Agropecuario*. <https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario>
- [22] Sonami. (2018). *Informe del agua y la minería en Chile*. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2020/06/informe-de-agua-2018.pdf>
- [23] Ciencia en Chile. (2022). *Consumo de agua en recintos hoteleros de Chile...* <https://www.cienciaenchile.cl/consumo-de-agua-en-recintos-hoteleros-de-chile-es-seis-veces-mayor-que-en-europa/>
- [24] El Mostrador. (2024, abril 3). *Consumo de agua en recintos hoteleros de Chile...* <https://www.elmostrador.cl/revista-jengibre/viajes/2024/04/03/consumo-de-agua-en-recintos-hoteleros-de-chile-es-seis-veces-mayor-que-en-europa/>
- [25] Biopur Habitat. (s.f.). *¿Qué caudal de agua según el diámetro de la tubería?* https://www.biopur-habitat.com/es/blog/10_que-caudal-de-agua-segun-el-diametro-de-la-tuberia.html
- [26] Diario Financiero. (2021, marzo 22). *Industria sanitaria al debe: un tercio del agua que se produce se pierde*. <https://www.df.cl/empresas/industria/industria-sanitaria-al-debe-un-tercio-del-agua-que-se-produce-se-pierde>

- [27] Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2021). *Guía técnica de pérdidas físicas reales*. <https://s3.amazonaws.com/documentos.anid.cl/investigacion-aplicada/2021/retos/GuiaTecnicaSuperintendenciaServiciosSanitarios.pdf>
- [28] Fundación Chile. (2019). *Aguas residuales como fuente de agua*. <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/aguas-residuales-como-fuente-de-agua.pdf>
- [29] Universidad de Chile. (2021). *Modelo de pérdidas en tranques*. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/185698/Modelo-fenomenologico-de-perdidas-de-agua-en-depositos-de-relaves-convencionales.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [30] Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2021). *Pérdidas en captaciones superficiales*. [citada indirectamente, vía fuentes anteriores]
- [31] Mimbral. (s.f.). *Tubería HDPE 200 mm (8") x 6,096 m corrugado*. Recuperado el 30 de mayo de 2025, de <https://www.mimbral.cl/tuberia-hdpe-200mm-8-x-6-096mt-corrugado/p?srsId=AfmB0oqoGejdfXz4rZ6PzMIQzZDxo2qTgwrIwI465uu1zaGy2GzC-V8C4>
- [32] 2x3. (s.f.). *Precios de instalación de tuberías en Chile: Guía de valores*. <https://www.2x3.cl/p/precios-instalacion-tuberias>
- [33] Ministerio de Higiene, Asistencia, Previsión y Trabajo. (s.f.). *Decreto N° 236. Reglamento general de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes, cámaras de contacto, cámaras absorbentes y letrinas domiciliarias*. Gobierno de Chile.
- [34] Notsarro. (s.f.). *Limpieza de cañerías*. Notsarro. <https://notsarro.cl/producto/limpieza-de-canerias/>
- [35] 2x3. (s.f.). *Precios para arreglar una tubería con gotera*. 2x3.cl. <https://www.2x3.cl/p/precios-arreglar-tuberia-gotera>
- [36] Sodimac Homecenter. (s.f.). *¿Cómo hacer mantenimiento de las tuberías?* Homecenter Colombia. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/content/como-hacer-mantenimiento-de-las-tuberias/>
- [37] Gobierno Regional de Coquimbo. (2025, 12 de marzo). *Gobierno Regional triplica inversión para fortalecer el abastecimiento de agua potable rural*. <https://www.gorecoquimbo.cl/gobierno-regional-triplica-inversion-para-fortalecer-el-abastecimiento/gorecoquimbo/2025-03-12/105056.html>
- [38] Aguas Andinas. (2025, mayo). *Boleta de suministro de agua potable N.º 93848-3*. Santiago, Chile.

- [39] Aguas Andinas. (s.f.). *Nuestras operaciones*. Aguas Andinas Inversionistas. <https://www.aguasandinasinversionistas.cl/es/nuestro-negocio/nuestras-operaciones>

8. Anexos



Figura 1: Mapa distribución nodos en Andacollo