



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe 2

Optimización de riego agrícola

Grupo 78

Ivanova Álvarez Barría 19205759 sección 1
Joaquín Jiménez Infante 18642365 sección 1
Felipe Medina Osorio 19624765 sección 1
Nicolás Ortiz Leiva 20641311 sección 1
Michael Román Carrión 19202083 sección 4
Maximiliano Tombolini Troncoso 21643113 sección 2
Daniela Urrutia Duarte 19205465 sección 3

Fecha entrega: viernes 30 de mayo de 2025

Índice

1. Descripción del Problema	3
1.1. Contexto	3
1.2. Impacto	4
1.3. Objetivo	4
2. Modelación	6
2.1. Conjuntos	6
2.2. Parámetros	6
2.3. Variables de Decisión	7
2.4. Función Objetivo	8
2.5. Restricciones	9
3. Referencias bibliográficas	11

1. Descripción del Problema

1.1. Contexto

La Región de O'Higgins, enfrenta una crisis hídrica que amenaza su sostenibilidad productiva. Según la Comisión Nacional de Riego (2020), la horticultura consume el 70 % de los recursos hídricos regionales, pero sufre las consecuencias de una reducción del 30-40 % en precipitaciones durante las últimas tres décadas (Barria, Sandoval y González, 2021). Esta situación se agrava por prácticas de riego obsoletas, como el método de surcos con apenas 40-50 % de eficiencia frente al 80-90 % de sistemas tecnificados (FIA, 2021). Los pequeños agricultores, que representan el 85 % de las explotaciones (ODEPA, 2022), carecen de acceso a herramientas que integren variables clave: datos agronómicos de cultivos, pronósticos climáticos estacionales y propiedades dinámicas de suelos que varían desde arcillas costeras hasta franco-arenosos del valle central (INIA, 2019).

Actualmente, las decisiones se basan en experiencia empírica, generando sobreexplotación de acuíferos, tales como Pichidegua que presenta descensos de 2 m/año (DGA, 2022) y la subutilización de lluvias invernales que concentran el 90 % de los 350 mm anuales (CR2, 2023). La Fundación para la Innovación Agraria (FIA), como tomador de decisiones, requiere un modelo de optimización con horizonte de 180 días (una temporada de cultivo) que genere planes diarios de riego, adaptándose a ventanas críticas de demanda hídrica y pronósticos meteorológicos de corto plazo (López, 2016).

La implementación de sistemas automatizados de riego en este contexto requiere obligatoriamente monitoreo en tiempo real (sensores de humedad), pues sin datos precisos la automatización puede generar riegos ineficientes o daños por anegamiento. A esto se suma la limitada infraestructura eléctrica rural, que restringe la potencia disponible para bombeo, forzando a priorizar fuentes como energía solar con baterías en períodos de alta demanda.

1.2. Impacto

Resolver esta problemática mediante un modelo de optimización generaría beneficios monumentales. Cuantitativamente, estudios de Valdés-Pineda, Pizarro y García-Chevesich (2016) demuestran reducciones del 20-30 % en el consumo hídrico, equivalente a 8,000 m³ anuales en 5 hectáreas, traduciendo en un ahorro de \$1.2 millones CLP en costos operativos (CNR, 2020). La integración de datos pluviales permitiría suprimir riegos innecesarios en el 15 % de los días con lluvias significativas (CR2, 2023), optimizando recargas naturales.

Cualitativamente, fortalecería la resiliencia climática ante sequías, las cuales redujeron el PIB agrícola regional en 7 % desde 2010 (CEPAL, 2021), mientras se protegen acuíferos que actualmente se encuentran sobreexplotados.

Los datos requeridos incluyen parámetros agronómicos (demandas hídricas por cultivo) de bases del INIA, series históricas pluviométricas del CR2, costos energéticos de la CNE, propiedades edáficas del catastro de suelos ODEPA. Estos se complementarían con simulaciones para escenarios climáticos extremos, calibradas con datos de la Dirección Meteorológica de Chile.

1.3. Objetivo

El objetivo central del modelo es minimizar el costo total del sistema de riego, integrando cuatro componentes clave: costos de extracción / compra de agua de diversas fuentes, consumo energético en bombeo, penalizaciones por déficit hídrico que comprometen rendimientos, costos de oportunidad por tierras no cultivadas, e inversión en tecnologías de monitoreo y automatización. El tomador de decisiones (FIA) debe determinar diariamente:

1. La asignación óptima de volúmenes hídricos desde fuentes como pozos, red municipal, tanques de lluvia o agua comprada en camiones hacia cada sector cultivado, considerando eficiencias de riego específicas.
2. La gestión de almacenamiento en estanques, incluyendo recargas de fuentes externas durante períodos de bajo costo energético.

3. La configuración de cultivos por sector, garantizando cobertura hídrica mínima estacional para mantener productividad.

Para asegurar la viabilidad de los cultivos, el modelo garantiza que al menos el 70 % de la demanda hídrica estacional ($\gamma = 0,7$) sea satisfecha, según recomendaciones de la FAO para horticultura en zonas áridas. Además, estas decisiones operativas están sujetas a restricciones técnicas fundamentales:

- El balance hídrico debe satisfacer que el agua efectivamente aplicada más el déficit calculado iguale la demanda del cultivo en cada sector.
- Las extracciones de fuentes externas no puedan superar límites contractuales o técnicos.
- El almacenamiento en tanques debe respetar capacidades máximas y minimizar riesgos de desborde.
- La potencia consumida en bombeo no puede exceder la disponible de fuentes energéticas, considerando la intermitencia de redes rurales y capacidad de sistemas fotovoltaicos.
- Solo sectores designados para cultivo pueden recibir riego.
- La automatización del sistema requiere previamente la implementación de monitoreo.
- Se garantice un método de riego único donde cada sector regado en un día dado utilice exactamente un método de riego específico.

Por ejemplo, bombear 1 m^3 desde un pozo de 50 m de profundidad usando energía diésel con bomba de 65 % eficiencia tendría un costo compuesto por \$1,200 CLP por extracción más \$780 CLP por energía, relación que el modelo optimizar diariamente considerando fluctuaciones tarifarias.

Esta estructura decisional, alineada con estándares de la FAO para gestión hídrica agrícola, permite no solo reducir costos inmediatos, sino también evaluar escenarios de inversión tecnológica donde sistemas automatizados con monitoreo incrementan eficiencia pero conllevan mayores costos energéticos, creando equilibrios óptimos entre sostenibilidad financiera y resiliencia productiva.

2. Modelación

2.1. Conjuntos

- $A : \{1, \dots, N_A\}$: Sectores de la parcela
- $T : \{1, \dots, N_T\}$: Períodos de tiempo (días)
- $F : \{\text{tanque, pozo, red, comprada}\}$: Fuentes de agua
- $E : \{\text{red, diesel, solar}\}$: Fuentes de energía
- $P : \{(f, e) \mid f \in F, e \in E\}$: Bombas (asociadas a fuente y energía)
- $S : \{\text{arcilla, franco, arenoso}\}$: Tipos de suelo
- $R : \{\text{surco, goteo, aspersión}\}$: Métodos de riego

2.2. Parámetros

- $d_{a,t,s}$: Demanda hídrica en sector a , tiempo t , suelo s (m^3)
- $ll_{a,t}$: Lluvia efectiva directa en sector a , tiempo t (m^3)
- $\eta_{a,r}$: Eficiencia de riego en sector a con método r (0-1)
- C : Capacidad del estanque de lluvia (m^3)
- h_f : Altura manométrica para fuente f (m)
- η_p : Eficiencia de bomba p (0-1)
- $\rho g = 9,81$: Peso específico del agua (kN/m^3)
- c_f^W : Costo unitario de agua de fuente f (CLP/ m^3)
- $c_{e,t}^E$: Costo unitario de energía de fuente e en t (CLP/kWh)
- c^D : Penalización por déficit hídrico (CLP/ m^3)

- $P_e^{\text{máx}}$: Potencia máxima disponible de fuente e (kW)
- $Q_p^{\text{máx}}$: Caudal máximo de bomba p (m³/h)
- Q_a^{riego} : Caudal máximo de riego en sector a (m³/h)
- $\gamma = 0,7$: Cobertura hídrica mínima estacional
- β_a : Costo oportunidad por no cultivar sector a (CLP)
- m_a : Área del sector a (m²)
- Δt : Duración del período t (h)
- e_x : Energía consumida por monitoreo/periodo (kWh)
- e_ϕ : Energía consumida por automatización/periodo (kWh)
- c_{inv}^x : Costo inversión en monitoreo (CLP)
- c_{inv}^ϕ : Costo inversión en automatización (CLP)
- s_a : Tipo de suelo en sector a ($\in S$)
- l_t^{tanque} : Lluvia recolectada en el tanque en el tiempo t (m³)

2.3. Variables de Decisión

$q_{a,t,f} \geq 0$: Agua de fuente f a sector a en t (m³)

$y_{a,t} \in \{0,1\}$: 1 si sector a se riega en t

$w_{t,f} \geq 0$: Agua bombeada al tanque desde fuente f en t (m³)

$g_t \geq 0$: Agua almacenada en tanque al final de t (m^3)

$\delta_{a,t} \geq 0$: Déficit hídrico en sector a, t (m^3)

$z_a \in \{0, 1\}$: 1 si sector a se cultiva

$x \in \{0, 1\}$: 1 si se usa sistema de monitoreo

$\phi \in \{0, 1\}$: 1 si se usa sistema automatizado

$u_{a,t,r} \in \{0, 1\}$: 1 si se usa método r en sector a en t

2.4. Función Objetivo

Minimizar costos totales:

$$\begin{aligned}
\text{mín} \quad & \sum_{t \in T} \left(\sum_{a \in A} \sum_{f \in F} c_f^W q_{a,t,f} \right. \\
& + \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} c_{e(p),t}^E \frac{\rho g h_{f(p)}}{\eta_p} (q_{a,t,f(p)} + w_{t,f(p)}) \\
& \left. + \sum_{a \in A} c^D \delta_{a,t} \right) \\
& + \sum_{a \in A} \beta_a (1 - z_a) + c_{\text{inv}}^x x + c_{\text{inv}}^\phi \phi \\
& + \sum_{t \in T} (c_{\text{red}}^E t e_x x + c_{\text{red}}^E t e_\phi \phi)
\end{aligned}$$

2.5. Restricciones

1. Balance hídrico:

$$\sum_{f \in F} \left(\sum_r \eta_{a,r} u_{a,t,r} \right) q_{a,t,f} + \delta_{a,t} + l_{a,t} = d_{a,t,s_a} z_a \quad \forall a \in A, t \in T$$

2. Disponibilidad de potencia:

$$\sum_{p:e(p)=e} \frac{\rho g h_{f(p)}}{\eta_p \Delta t} \left(\sum_{a \in A} q_{a,t,f(p)} + w_{t,f(p)} \right) \leq P_e^{\max} \quad \forall e \in E, t \in T$$

3. Balance del tanque:

$$g_t = g_{t-1} + l_t^{\text{tanque}} + \sum_{\substack{f \in F \\ f \neq \text{tanque}}} w_{t,f} - \sum_{a \in A} q_{a,t,\text{tanque}} \quad \forall t \in T$$

$$0 \leq g_t \leq C \quad \forall t \in T$$

4. Activación de riego:

$$y_{a,t} \leq z_a \quad \forall a \in A, t \in T$$

$$\sum_{f \in F} q_{a,t,f} \leq Q_a^{\text{riego}} \cdot y_{a,t} \cdot \Delta t \quad \forall a \in A, t \in T$$

5. Cobertura hídrica mínima:

$$\sum_{t \in T} \left(\sum_{f \in F} \left(\sum_r \eta_{a,r} u_{a,t,r} \right) q_{a,t,f} \right) \geq \gamma z_a \sum_{t \in T} d_{a,t,s_a} \quad \forall a \in A$$

6. Límite de fuentes externas:

$$\sum_{a \in A} q_{a,t,f} \leq Q_{f,t}^{\max} \quad \forall f \in F \setminus \{\text{tanque}\}, t \in T$$

7. Requisito automatización:

$$\phi \leq x$$

8. Método de riego único:

$$\sum_r u_{a,t,r} = y_{a,t} \quad \forall a \in A, t \in T$$

9. Déficit solo si cultivado:

$$\delta_{a,t} \leq Mz_a \quad \forall a \in A, t \in T$$

2.6. Naturaleza de las Variables

$$q_{a,t,f} \geq 0 \quad \forall a \in A, t \in T, f \in F$$

$$w_{t,f} \geq 0 \quad \forall t \in T, f \in F$$

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

$$\delta_{a,t} \geq 0 \quad \forall a \in A, t \in T$$

$$y_{a,t} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, t \in T$$

$$z_a \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A$$

$$x, \phi \in \{0, 1\}$$

$$u_{a,t,r} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, t \in T, r \in R$$

3. Referencias bibliográficas

- Barria, P., Sandoval, M. & González, A. (2021). Water scarcity and institutional adaptation in Central Chile. *Water Resources Management*.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2023). *Reporte climático Región de O'Higgins*.
- Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2021). *Impacto económico del cambio climático en la agricultura chilena*.
- Comisión Nacional de Riego (CNR). (2020). *Informe de gestión hídrica en la Región de O'Higgins*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2022). *Informe de situación de acuíferos, Región de O'Higgins*.
- Fundación para la Innovación Agraria (FIA). (2021). *Diagnóstico de adopción tecnológica en horticultura*.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2019). *Caracterización de suelos en el valle central de O'Higgins*.
- López, R. (2016). *Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el Sur de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2022). *Catastro Frutícola Región de O'Higgins*.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R. & García-Chevesich, P. (2016). Water governance in Chile: Evidence from the O'Higgins Region. *Environmental Science Policy*.