



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

ANÁLISIS HIDROECONÓMICO DE ADAPTACIÓN AL  
CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE GESTIÓN DE  
RECURSOS HÍDRICOS MEDIANTE REUTILIZACIÓN DE  
AGUAS RESIDUALES. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL  
RÍO ELQUI, CHILE.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Arriagada Trujillo, Felipe

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

Director/a Experimental: VERES JORDA, ERNESTO

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# Trabajo Fin de Máster

*ANÁLISIS HIDROECONÓMICO DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO  
CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS  
MEDIANTE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES. APLICACIÓN A  
LA CUENCA DEL RÍO ELQUI, CHILE.*

**Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HIDRICOS*

**Autor:**

*FELIPE EDUARDO ARRIAGADA TRUJILLO*

**Tutor:**

*DR MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ*

*DR HECTOR MACIÁN SORRIBES.*

**Cotutor:**

*ERNESTO VERES JORDÁ.*

**SEPTIEMBRE, 2023**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis hidroeconómico de adaptación al cambio climático en sistemas de gestión de recursos hídricos mediante reutilización de aguas residuales. Aplicación a la cuenca del río Elqui, Chile.

**Título del TFM en inglés:** Hydroeconomic assessment of climate change impacts and analysis of alternatives for joint use and reuse of wastewater treatment plants in the Elqui river (Chile).

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi hidroeconòmica d'adaptació al canvi climàtic en sistemes de gestió de recursos hídrics emprant reutilització d'aigües residuals. Aplicació a la conca del riu Elqui, Xile.

**Alumno:** Felipe Eduardo Arriagada Trujillo

**Tutor:** DR. Manuel Augusto Pulido Velázquez

**Cotutor:** DR. Héctor Macián Sorribes

**Cotutor Externo:** Ernesto Veres Jordá

**Fecha de Lectura:** septiembre, 2023

### Resumen

En los últimos años el Estado de Chile, a través de los trabajos realizados por la Dirección General de Aguas (DGA) y el Ministerio de Medio Ambiente, ha levantado una preocupación debido a la menor disponibilidad de agua esperada, evidenciada por diversos estudios de vulnerabilidad social, económica y ambiental frente al cambio climático. Además de dicha vulnerabilidad, es evidente la mejorable gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, que, hasta ese momento, no era considerada frecuentemente en los estudios hídricos realizados en Chile (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Para subsanar la brecha de planificación hidrológica, el Estado de Chile ha trabajado en los denominados “Planes Estratégicos de Recursos Hídricos” (PEGH en adelante) en las principales cuencas hidrográficas del país. Estos planes proponen emplear modelos de simulación de recursos hídricos con los datos disponibles, sin contemplar análisis

económicos detallados, que son importantes para la toma de decisiones de inversión. El estudio pretende profundizar en el análisis económico empleando modelos hidroeconómicos.

En este documento se estudiará el caso del sistema de recursos de la cuenca del río Elqui. La gestión de recursos de este sistema es cada vez más compleja y difícil de realizar debido a su fragilidad, especialmente en el suministro de agua para regadío en el sector agrícola, principal usuario del agua y esencial actividad productiva para el desarrollo de la región, que depende del cultivo, el suelo y su infraestructura. Para mitigar la fragilidad del sistema evidenciada y adaptarse al cambio climático, el PEGH del Elqui simula escenarios de dos medidas de adaptación: la instalación de una planta desaladora en los sectores costeros y la recarga artificial de acuíferos en la zona del Elqui Bajo.

Para complementar las medidas de adaptación, el presente trabajo incluye una nueva medida: la reutilización de aguas desde las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), en Chile denominadas Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). Se ha realizado un desarrollo metodológico que permite estimar la prefactibilidad técnico-económica de implementar en el corto plazo dicha medida. Se tomará en cuenta la experiencia internacional y las normativas que rigen al país en estas materias.

En primera instancia se evalúan las EDAR del sistema Elqui, tomando en cuenta su caudal de aportación, el medio receptor y su influencia en el balance hídrico. Del análisis anterior se define la mejor opción de reutilización de aguas residuales, en este caso la EDAR *La Serena*, ubicada en el sector costero, específicamente en la ciudad de La Serena y su límite con la ciudad de Coquimbo.

El siguiente paso es realizar un análisis técnico-económico que determine la ubicación de la inyección de la nueva oferta hídrica en los sectores con mayor déficit de recurso hídrico. En este caso, se determina que uno de los lugares más vulnerables de la cuenca es el estero El Culebrón.

Con los datos aportados del modelo actual del PEGH y estudios tarifarios de empresas sanitarias se construye un nuevo modelo de simulación específico en la zona, con la

herramienta de software WEAP (Water Evaluation And Planning; SEI). Utilizando el modelo se proponen nuevos escenarios de cambio climático y gestión específicos hasta el año 2050, analizando los usos de agua y demandas a los cuales incorporar el nuevo recurso de reutilización, tomando en cuenta el manejo integrado de usos, las características de la cuenca, sus fuentes superficiales y subterráneas.

Finalmente, con los resultados de los déficits de demanda calculados y mediante la definición de funciones económicas de demanda se realiza un análisis hidroeconómico para determinar el coste de escasez asociado a los déficits en las demandas, así como el incentivo de aumentar las superficies regadas y/o ayudar a la sustentabilidad de acuíferos. Además, se incorporan al análisis los antecedentes económicos de producción, costes de construcción e implementación. Con estos resultados se obtuvieron conclusiones que proponen la reutilización de aguas residuales como una medida factible de adaptación a los problemas de sequía en el sistema, entregando un modelo de simulación específico para ser utilizado en el futuro por los regantes.

## Resum

En els últims anys l'Estat de Xile, a través dels treballs realitzats per la Direcció General d'Aigües (DGA) i el Ministeri de Medi Ambient, ha desenvolupat una preocupació a causa de la menor disponibilitat d'aigua esperada, evidenciada per diversos estudis de vulnerabilitat social, econòmica i ambiental enfront del canvi climàtic. A més d'aquesta vulnerabilitat, és evident la millorable gestió de l'ús conjunt d'aigües superficials i subterrànies que, fins a aqueix moment, no era considerada sovint en els estudis hídrics realitzats a Xile (DGA , 2020).

Per a esmenar la situació de la planificació hidrològica, l'Estat de Xile ha treballat en els denominats "Plans Estratègics de Recursos Hídrics"; (PEGH) en les principals conques hidrogràfiques del país. Aquests plans proposen emprar models de simulació de recursos hídrics amb les dades disponibles, sense contemplar anàlisis econòmiques detallats, que són importants per a la presa de decisions d'inversió.

En aquest document s'estudiarà el cas del sistema de recursos hídrics de la conca del riu Elqui. La gestió de recursos d'aquest sistema és cada vegada més complexa i difícil de realitzar a causa de la seua fragilitat, especialment en el subministrament d'aigua per a regadiu en el sector agrícola, principal usuari de l'aigua i essencial activitat productiva per al desenvolupament de la regió, que depèn del cultiu, el sòl i la seua infraestructura (DGA, 2020). Per mitigar la fragilitat del sistema evidenciada i adaptar-se al canvi climàtic, el PEGH de l'Elqui simula escenaris amb dues mesures d'adaptació: la instal·lació d'una planta dessaladora en els sectors costaners i la recàrrega artificial d'aqüífers en la zona de l'Elqui Baix.

Per complementar les mesures d'adaptació, el present treball inclour una nova mesura: la reutilització d'aigües des de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDAR), a Xile denominades Plantes de Tractament d'Aigües Servides (PTES). Per assolir aquest objectiu s'ha realitzat un desenvolupament metodològic que permet estimar la prefactibilitat técnico - econòmica d'implementar en el curt termini aquesta mesura. Es tenen en compte l'experiència internacional i les normatives que regeixen al país en aquestes matèries.

En primera instància s'avaluen les EDAR del sistema Elqui, tenint en compte el seu cabdal d'aportació, el mitjà receptor i la seua influència en el balanç hídric. De l'anàlisi anterior es defineix la millor opció de reutilització d'aigües residuals, en aquest cas la EDAR situada en el sector costaner, específicament a la ciutat de La Serena i el seu límit amb la ciutat de Coquimbo. El següent pas és realitzar una anàlisi técnico - econòmica que determine la ubicació de la injecció de la nova oferta hídrica en els sectors amb major dèficit de recurs hídric. En aquest cas, es determina que un dels llocs més vulnerables de la conca és el rierol Culebrón.

Amb les dades aportades del model actual del PEGH i estudis tarifaris d'empreses sanitàries es construeix un nou model de simulació específic en la zona, amb l'eina informàtica WEAP (Water Evaluation And Planning). Utilitzant el model es proposen nous escenaris de canvi climàtic i de gestió específics fins l'any 2050, analitzant els usos d'aigua i demandes als quals incorporar el nou recurs de reutilització, tenint en compte el maneig

integrat d'usos, les característiques de la conca, així com les seues fonts superficials i subterrànies.

Finalment, amb els resultats dels dèficits de demanda calculats i mitjançant la definició de funcions econòmiques de demanda, es realitza una anàlisi hidroeconómica per determinar el cost d'escassetat associat als dèficits en les demandes, l'incentiu d'augmentar les superfícies regades i/o ajudar a la sustentabilitat d'aqüífers. A més, s'incorporen a l'anàlisi els antecedents econòmics de producció, costos de construcció i implementació. Amb aquests resultats s'obtenen conclusions que proposen la reutilització d'aigües residuals com una mesura factible d'adaptació als problemes de sequera en el sistema, entregant un model de simulació específic per a ser utilitzat en el futur pels regants.

#### Abstract

In recent years, the State of Chile, through the work of the General Directorate of Water (DGA) and the Ministry of Environment, has raised a concern due to the decreasing water availability, evidenced of various social, economic and environmental studies in the face of climate change. In addition to this social vulnerability, it is evident the improvable management of the joint use of surface and groundwaters, which until now was not frequently considered in the water studies carried out in Chile (General Directorate of Waters (DGA), 2020).

To restore the water management planning gap, the State of Chile has worked on the so-called "Strategic Water Resources Plans" (PEGH) in the main hydrological basins of the country. These plans propose using simulation models of water resources with the available data and without contemplating detailed economic analysis, which are important for making investment decisions.

This document studies the Elqui river basin resource system case. The water management of this system is increasingly complex and difficult to carry out due to its fragility in the supply of water for agricultural irrigation. The agricultural sector is the main user of water as it is an essential productive activity for the development of the

region, which is also dependent on the crops, the soil and its infrastructure (General Directorate of Waters (DGA), 2020). To mitigate the evidenced fragility of the system and adapt to climate change, the Elqui PEGH simulates scenarios of two adaptation measures: the installation of a desalination plant in the coastal sectors and the artificial recharge of aquifers in the Elqui Bajo area.

To complement the adaptation measures, this document includes a new measure: the reuse of water from the Wastewater Treatment Plants (EDAR) in Chile called Sewage Treatment Plants (PTAS). To do so, a methodological development that allows estimating the technical-economic pre-feasibility of implementing this measure in the short term has been carried out. The international experience and the regulations that govern the country in these matters will also be taken into account.

At first instance, the WWTPs of the Elqui system an evaluation is made taking into account their input flow, the receiving environment and their influence on the water balance. From the previous analysis, the best option for wastewater reuse is defined, in this case it is the WWTP located in the coastal sector specifically in the city of La Serena and its border with the city of Coquimbo.

The next step is to carry out a technical-economic analysis that determines the location of the injection of the new water supply in the sectors with the greatest deficit of water resources. On this occasion, it is determined that one of the most vulnerable places in the basin is the El Culebrón estuary.

With the data provided from the current PEGH model and tariff studies from sanitation companies, a new specific simulation model is built in the area, with the WEAP (Water Evaluation And Planning) software tool. Using the model, new specific climate change and management scenarios are proposed until the year 2050. The water uses and demands to which to incorporate the new reuse resource are analyzed, considering the integrated management of uses, the characteristics of the basin, such as its surface and underground sources.



Finally, with the results of the calculated demand deficits and through the definition of economic demand functions, a hydroeconomic analysis is carried out. Its objective is to determine the scarcity cost associated with the demand deficits, the incentive to increase the irrigated surfaces and/or help to the sustainability of aquifers. In addition to the above, the economic background of production, construction costs and implementation are incorporated into the analysis. With these results, conclusions are obtained proposing the reuse of wastewater as a feasible measure of adaptation to drought problems in the system, providing a specific simulation model to be used in the future by irrigators.

**Palabras clave español:** cambio climático, reutilización, aguas residuales, uso conjunto, adaptación

**Palabras clave valenciano:** canvi climàtic, reutilització, aigües servides, ús conjunt, adaptació

**Palabras clave ingles:** climate change, reuse, wastewater, conjuntive use, adaptation



## AGRADECIMIENTOS

Una de las secciones más importante del presente trabajo y el recorrido de este proceso es el agradecer, por qué así me enseñó mi familia, sin importar las dificultades que presente la vida, la perseverancia siempre tiene una recompensa en sus distintas dimensiones, y esta viene dada por las situaciones, personas, maestros, de los que uno aprende con cada palabra, cada detalle y cada acción.

Sin más, agradezco enormemente la experiencia y los conocimientos adquiridos, la enseñanza, paciencia de los profesores Manuel y Héctor, el tiempo dedicado por Ernesto. Gracias por el apoyo incondicional de Javiera mi polola, también de mi familia y amigos en Chile y España que me acompañaron en este largo camino y creyeron en mí. A mi banda por soportar el tiempo que estuvimos alejados. Agradecimiento especial a mis compañeros del máster, sin ellos el camino hubiese sido muy difícil. Mención a la música, bandas primordiales como Ramones y Red Hot Chili Peppers, que me acompañaron en momentos donde los necesité.



## Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN Y OBEJTIVOS .....	1
1.1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2	Motivación.....	1
1.3	Objetivos.....	2
1.4	Estructura del documento .....	3
2	ANTECEDENTES .....	4
2.1	CONTEXTO Y SITUACIÓN ACTUAL de la gestión de RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE... 4	
2.1.1	Cambios, efectos y proyecciones del cambio climático en Chile.....	5
2.2	GESTIÓN de RECURSOS HÍDRICOS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO .....	6
2.3	EXPERIENCIA INTERNACIONAL DE LA GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES .....	9
2.3.1	Reutilización de aguas residuales tratadas en España.....	12
2.4	ANÁLISIS DE GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN CHILE Y LA REGIÓN DE COQUIMBO	
	15	
2.4.1	Aspecto jurídico-normativo chileno.....	16
2.4.2	Infraestructura de una planta reutilización de aguas en Coquimbo .....	18
3	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO .....	20
3.1	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE LA CUENCA DE ESTUDIO .....	21
3.2	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PTAS DEL SISTEMA ELQUI.....	22
3.3	CÁLCULO DE LAS APORTACIONES FUTURAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS y selección de UBICACIÓN para su inclusión. ....	22
3.4	MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y OBTENCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA LA ZONA DE ESTUDIO. ....	24
3.5	IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS .....	24
3.5.1	Descripción del software WEAP.....	24



3.5.2	Modelos de Circulación General .....	26
3.5.3	Obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio .....	27
3.5.4	Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón .....	27
3.5.5	Calibración y validación.....	28
3.6	CÁLCULO HIDROECONOMICO DE LOS RESULTADOS DE LA GESTIÓN.....	29
3.6.1	Costes directos de inversión y los costes de producción de agua reutilizada ...	29
3.6.2	Estimación de costes de los sistemas proyectados.....	31
3.6.3	Estimación agroeconómica .....	36
3.6.4	Cálculo de evaluación hidroeconómica .....	37
4	CASO DE ESTUDIO: REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN SISTEMA ELQUI. ....	39
4.1	ANÁLISIS ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL VALLE DEL RÍO ELQUI.....	39
4.1.1	Dimensión física de la cuenca .....	39
4.1.2	Caracterización climática .....	39
4.1.3	Balance hídrico de la cuenca .....	41
4.1.4	Aguas residuales en la cuenca del Elqui.....	45
4.2	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PTAS PARA REUTILIZACIÓN .....	53
4.2.1	Selección de PTAS para reutilización.....	53
4.3	APORTACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES .....	54
4.3.1	Cálculo de caudal reutilizable.....	55
4.3.2	Selección de ubicación para la inclusión de nueva aportación.....	58
4.3.3	Identificación de zonas de riego .....	60
4.4	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y OBTENCIÓN DE DATOS FUTUROS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	61
4.4.1	Modelos de Circulación General para escenarios de cambio climático (CC).....	62
4.4.2	Obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio .....	63



4.5	NUEVOS ESCENARIOS DE GESTIÓN INCORPORANDO REUTILIZACIÓN DE PTAS PUNTUALIZADO EN ESTERO EL CULEBRÓN.....	67
4.5.1	Hipótesis y descripción del Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón .....	68
4.5.2	Calibración del modelo.....	72
4.5.3	Resultados del Modelo Estero El Culebrón sin incluir reutilización de aguas residuales .....	74
4.5.4	Resultados del Modelo Estero el Culebrón incluyendo reutilización de aguas residuales .....	76
4.6	ANÁLISIS HIDROECONÓMICO .....	79
4.6.1	Tratamiento de aguas residuales .....	80
4.6.2	Sistema de conducciones, plantas elevadoras y estanques proyectadas.....	84
4.6.3	Estimación agroeconómica .....	94
4.6.4	Cálculo de evaluación hidroeconómica .....	107
5	SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....	116
6	REFERENCIAS .....	120

## Índice de figuras

Figura 2-1.	Descenso de los recursos hídricos en la región de Coquimbo.....	7
Figura 2-2.	Esquema del proceso y tratamientos para la reutilización de aguas residuales. ...	18
Figura 3-1.	Diagrama de flujo del proceso metodológico.....	21
Figura 3-2.	Esquema de cálculo de caudal de aportación.....	23
Figura 3-3.	Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología. .....	26
Figura 3-4.	Clasificación de modelos de acuerdo con distribución de según indicadores como NSE y PBIAS. ....	27

Figura 3-5. Curva de ajuste para la determinación de costes de O&M en PTAS de Lodos Activados. ....	34
Figura 3-6. Curva de ajuste para la determinación de costes de O&M en PTAS sistema MBR. ....	35
Figura 3-7. Esquema conceptual de estimación de costes de escasez de demanda agrícola. ....	36
Figura 4-1. Perfil topográfico W-R a la latitud de 30° en la cuenca del río Elqui. ....	39
Figura 4-2. Clasificación de Zonas Climáticas Köppen-Geisger. ....	40
Figura 4-3. Diagrama unifilar de los cauces principales de la cuenca del Elqui. ....	40
Figura 4-4. Descenso de volumen en acuíferos de Sistema Elqui MGC CSIRO y CCSM4. ....	43
Figura 4-5. Distribución porcentual de usos demandados. ....	44
Figura 4-6. Registro de Caudal de desembocadura simulado. ....	44
Figura 4-7. Puntos de posibles emplazamientos de plantas desaladoras y reutilización. ....	50
Figura 4-8. Caudal proyectado de aguas servidas en la comuna de La Serena desde 2019 a 2050. ....	58
Figura 4-9. Zonas de riego canal Bellavista. ....	60
Figura 4-10. Temperatura promedio mensual estero El Culebrón. ....	65
Figura 4-11. Precipitación promedio mensual estero El Culebrón. ....	66
Figura 4-12. Caudales promedio mensual estero El Culebrón. ....	66
Figura 4-13. Topología de modelo en zona del estero El Culebrón. ....	69
Figura 4-14. Supuestos clave del modelo en zona del estero El Culebrón. ....	70
Figura 4-15. Calibración de niveles de pozos del modelo acoplado. ....	72
Figura 4-16. Estadígrafo de estación fluviométrica El Sifón. ....	73
Figura 4-17. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: Déficit de demanda, caudal de demanda. ....	74
Figura 4-18. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: oferta de riego, caudal de reúso, caudal de demanda y oferta extra. ....	75
Figura 4-19. Gráfica de déficit porcentual entre MCG. ....	76
Figura 4-20. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: oferta de riego, caudal de reúso, caudal de demanda y oferta extra. ....	77
Figura 4-21. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: caudal de demanda, excedente, y oferta extra. ....	77

Figura 4-22. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CCSM4, considerando: oferta de riego, caudal de reúso, caudal de demanda y oferta extra. ....	78
Figura 4-23. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CCSM4, considerando: caudal de demanda, excedente, y oferta extra. ....	79
Figura 4-24. Trazada y emplazamiento del sistema de conducción N°1. ....	85
Figura 4-25. Esquema de perfil de solución de conducción N°1. ....	86
Figura 4-26. Trazada y emplazamiento del sistema de conducción N°2. ....	86
Figura 4-27. Esquema de perfil de solución de conducción N°2. ....	87
Figura 4-28. Ficha técnico-económica del apio de la región de Coquimbo. ....	95
Figura 4-29. Gráfica de Demanda (Ha/año) ZR_COS_03.....	101
Figura 4-30. Gráfica de Demanda (Ha/año) ZR_ELQ_08.....	101
Figura 4-31. Gráfica de demanda en zonas de riego comparativa Tecnificado vs No Tecnificado. ....	102
Figura 4-32 Demanda de riego en canal Bellavista. ....	103
Figura 4-33. Curva de beneficios netos sector 3, Elqui bajo. ....	104
Figura 4-34. Curva de demanda de agua sector Elqui bajo.....	104
Figura 4-35. Comparativa de estimación de beneficios netos. ....	106
Figura 4-36. Relación de pérdidas de dinero con el coste de escasez para los MCG CSIRO y CCSM4. ....	107
Figura 4-37. Margen bruto del cual se beneficiarían los agricultores. ....	108
Figura 4-38 Vista área del humedal El Culebrón. ....	111
Figura 4-39. Tabla de valores de beneficios de humedales urbanos en la ciudad de Cali.....	114

## Índice de tablas

Tabla 2-1. Características y usos de aguas tratadas según tipo de planta.....	19
Tabla 4-1. Oferta en la fuente, periodo 1990-2019. ....	41
Tabla 4-2. Resumen de demandas de la cuenca del río Elqui.....	42
Tabla 4-3. Registro de PTAS en la cuenca del río Elqui. ....	49
Tabla 4-4. Caracterización ambiental en base a variables. ....	51
Tabla 4-5. Resultados conclusiones preliminares de ubicación.....	52
Tabla 4-6. Análisis de PTAS en la cuenca del río Elqui. ....	53

Tabla 4-7. Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna La Serena.....	56
Tabla 4-8. Canales de regadío influyentes en la cuenca, zona Elqui bajo.....	59
Tabla 4-9. MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (Dirección General de Aguas (DGA), 2017c). ....	62
Tabla 4-10. Estadísticos de precipitación anual para el período histórico y 4 MCG.....	63
Tabla 4-11. Estadísticos de temperatura anual para el período histórico y 4 MCG. ....	64
Tabla 4-12. Estadísticos de caudales anuales simulados para el período histórico y 4 MCG..	65
Tabla 4-13. Indicadores de Calidad de Calibración para el periodo histórico (1990 -2019) en las estaciones DGA de la cuenca. ....	73
Tabla 4-14. Cultivos agrícolas que utilizan aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente. ....	81
Tabla 4-15. Calidad sugerida de aguas residuales tratadas de acuerdo con parámetros físicos, químicos y biológicos. ....	82
Tabla 4-16. Límites máximos permitidos para normas de calidad de agua de riego y descargas de submarinos fuera de litoral.....	82
Tabla 4-17. Procesos de tratamiento en PTAS para cada sistema proyectado. ....	88
Tabla 4-18. Potencia Instalada Plantas elevadoras sistema 1. ....	89
Tabla 4-19. Potencia Instalada Plantas elevadoras sistema 2. ....	90
Tabla 4-20. Estanques de succión y almacenamiento sistema La Serena. ....	90
Tabla 4-21. Áreas requeridas PTAS Sistema La Serena. ....	90
Tabla 4-22. Costes Sistema 1 de reúso La Serena.....	91
Tabla 4-23. Costes Sistema 2 de reúso La Serena.....	92
Tabla 4-24 Resumen de fichas técnico-económicas cítricos.....	96
Tabla 4-25 Resumen de fichas técnico-económicas cereales.....	97
Tabla 4-26 Resumen de fichas técnico-económicas hortalizas.....	98
Tabla 4-27 Resumen de beneficio o margen neto promedio por cultivos y zonas de riego. ....	100
Tabla 4-28. Margen bruto de zonas de riego para consideradas en €/ha.....	105
Tabla 4-29. Eficiencia de remoción mediante alternativas de Lodos Activados y sistemas MBR. ....	109
Tabla 4-30. Beneficio por recarga de acuíferos. ....	109
Tabla 4-31. Resumen de resultados de evaluación Hidroeconómica con VAN y TIR. ....	115



## Tabla de ecuaciones

Ecuación 1 .....	25
Ecuación 2 .....	25
Ecuación 3 .....	25
Ecuación 4 .....	28
Ecuación 5 .....	30
Ecuación 6 .....	31
Ecuación 7 .....	33
Ecuación 8 .....	33
Ecuación 9 .....	33
Ecuación 10 .....	35
Ecuación 11 .....	35
Ecuación 12 .....	35
Ecuación 13 .....	37
Ecuación 14 .....	37
Ecuación 15 .....	37
Ecuación 16 .....	38

## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos hídricos ha sido punto clave para el desarrollo económico de Chile, debido a su importancia en las actividades productivas. Los reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), indican que sus impactos estarán relacionados con cambios en el ciclo hidrológico. Es un hecho que existe un escenario probable de que el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS en adelante), sea más frecuente e intenso. Bajo esta premisa es posible que existan indicios de que el cambio climático este marcado por un aumento de lluvias intensas y periodos con inexorable escasez de lluvia en forma de sequía (Magaña, 2004). Sumado a lo anterior, otro parámetro importante y clave en el monitoreo del clima, es la temperatura. Estos parámetros (lluvia y temperatura), han tenido un sostenido aumento desde el siglo XIX, debido a los factores antropogénicos (IPCC, 2013).

El presente trabajo tiene su origen en los distintos escenarios que se prevén respecto al cambio climático en todo el mundo y en Chile, especialmente en sus regiones más áridas. Según indica (CRDP: Recursos Hídricos, 2021) se observa que cada vez comienza a disminuir más el agua superficial y, por tanto, los recursos hídricos que se encuentran en los acuíferos son aún más relevantes para el futuro. Teniendo en cuenta el aumento de las demandas, provocadas por el crecimiento demográfico, se hace imperativo el uso de la ciencia y tecnología para entregar respuestas contundentes a las necesidades de los distintos escenarios de escasez. (CRDP: Recursos Hídricos, 2021). Estos escenarios de escasez son los que motivan disponer de nuevas herramientas de cálculo para proponer elementos de adaptación al cambio climático, como es el reúso de agua.

### 1.2 MOTIVACIÓN

La motivación principal del trabajo es hacer una propuesta concreta de prefactibilidad de adaptación al cambio climático, incorporando nuevas fuentes de agua al sistema del río Elqui. Para ello se proponen metodologías de cálculo, análisis de datos, incluyendo la variable

económica, que muchas veces no es considerada, con pocos estudios específicos de ello en las diferentes subcuencas del país. Chile carece de estudios técnico-económico a escala de subcuenca para estimar costes y beneficios de implementar, proyectos de gran envergadura y adaptar las políticas públicas en torno a estas materias, que están desactualizadas en comparación a otros lugares del mundo, como por ejemplo España. Desde el país ibérico se extrae información valiosa que aporta al análisis en las regiones de clima mediterráneo en Chile. En este caso de estudio, se pretende realizar análisis de reutilización de aguas residuales desde las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), en Chile denominadas Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), para una zona en constante desertificación, sector árido y vulnerable al cambio climático, en específico la cuenca del río Elqui en la región de Coquimbo, Chile.

### 1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es: analizar desde un punto de vista económico el rol de reutilizar el agua proveniente de las plantas de aguas servidas en el sistema del río Elqui de la región de Coquimbo para adaptarse al cambio climático.

Para cumplir el objetivo general de este estudio se espera cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Revisar y analizar antecedentes del sistema, del modelo hidrológico del río Elqui existente y del uso de agua reutilizada.
- Calcular la oferta hídrica con base al reúso de aguas residuales tratadas del sistema del río Elqui.
- Construir un modelo hidroeconómico de simulación para analizar la respuesta de una sección vulnerable de la cuenca denominada estero El Culebrón, bajo distintos escenarios incluyendo el cambio climático.
- Calcular los costes y beneficios de recargas al sistema El Culebrón, a través de impulsiones.
- Estimar la prefactibilidad hidroeconómica para entregar soluciones a la escasez hídrica del sector agrícola y otros usos en el sector del estero El Culebrón.

#### 1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del documento está conformada por siete apartados sintetizados a continuación:

- 1) Introducción y objetivos: en primera instancia se presenta el trabajo a desarrollar, motivación y los objetivos que se plantea alcanzar.
- 2) Antecedentes: se revisa, investiga y expone la información en los campos en que se desarrolló el trabajo, como lo es la situación de los recursos hídricos en Chile y la región de Coquimbo, incluyendo el cambio climático. Se expone la experiencia nacional e internacional en materias de gestión de aguas residuales considerando aspectos jurídico-normativos.
- 3) Metodología del estudio: se describe la secuencia metodológica seguida en el presente trabajo, considerando la revisión de antecedentes de la cuenca, métodos de cálculo de aportaciones futuras de reutilización de aguas residuales, uso de modelos de cambio climático y obtención de datos meteorológicos, implementación de modelo de gestión de recursos hídricos y finalmente el cálculo hidroeconómico
- 4) Caso de estudio: en este apartado se presenta la aplicación de la metodología presentada asociada a la zona de estudio seleccionada del río Elqui. En este estudio se incluye, el cálculo de oferta hídrica, selección de modelos de circulación general de cambio climático, la implementación del modelo en la zona de estudio, sus resultados y análisis, además de presentar las estimaciones agroeconómicas e hidroeconómicas.
- 5) Síntesis y conclusiones: este apartado se realiza una síntesis de los conceptos presentados en el trabajo, además de emitir las conclusiones. Se busca exponer un cumplimiento de los objetivos propuestos.
- 6) Referencias: en este apartado se presentan las referencias bibliográficas que se han considerado y estudiado para la realización del presente estudio.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 CONTEXTO Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE

Es conocido que Chile tiene una gran diversidad de ecosistemas, climas, vegetaciones y patrones de uso de suelo. Si bien estas características dan indicio de que Chile tiene ventaja por sobre otros países, la realidad es muy distinta si analizamos las realidades territoriales (Fundación Chile, 2018).

Chile es un país vulnerable al cambio climático, ya que cumple con siete de nueve criterios de vulnerabilidad según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC):

- Áreas costeras de baja altura.
- Zonas áridas y semiáridas.
- Zonas de bosques.
- Territorio susceptible a desastres naturales.
- Áreas propensas a sequía y desertificación.
- Zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica.
- Ecosistemas montañosos.

Analizando por zona el país, la distribución de recursos hídricos en la zona norte es extremadamente seca, en tanto la zona central y sur tienen más bien un clima mediterráneo templado. Esto lo observamos también en la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas ya que estas varían entre 0,01 m<sup>3</sup>/s en la zona norte y 3.480 m<sup>3</sup>/s en la zona austral (Escenarios Hídricos 2030, 2018).

Por un lado, existe una oferta de los recursos hídricos en cada zona del país, y por otro lado la demanda de consumo de agua potable y de actividades productivas. Esta distribución de agua es muy variada puesto que la demanda de agua aumenta y se concentra notoriamente en las zonas donde se realizan estas actividades productivas, como son los valles centrales y su agricultura, o las zonas costeras de puertos con importantes urbanizaciones.

Por lo anterior, la disponibilidad de agua por habitante es más bien heterogénea, considerando la longitud del país. Podemos decir que la “mitad de Chile” posee una disponibilidad de agua subterránea por habitante menor a la media mundial. En las zonas áridas de la Región Metropolitana de Santiago de Chile, la media de disponibilidad de agua subterránea es menor a 800 m<sup>3</sup>/habitante/año, en tanto que para el sur del país la disponibilidad supera los 10.000 m<sup>3</sup>/habitante/año (Interior, 2015). Esto debido a la gran cantidad de glaciales distribuidos en el sur del país, en zonas hostiles de climas extremos, poca conectividad y acceso, donde no suelen existir una cantidad importante de habitantes.

Los usos habituales de consumo de agua en Chile son dirigidos a riegos de cultivos agrícolas, saneamiento, y para uso doméstico. En tanto los usos menos habituales van destinados a la actividad industrial, minería, piscicultura y para la energía hidroeléctrica. Dentro de estos usos el sector silvoagropecuario, consume 408 m<sup>3</sup>/s, contribuyendo con un 3% del Producto Interno Bruto (PIB en adelante). El sector minero se proyecta en los próximos veinticinco años como una demanda importante (el triple de la actual), tomando en consideración que la ubicación geográfica coincide con escasez de recurso hídrico, actualmente genera un 60 % de las exportaciones en el país. En cuanto al sector de agua potable y saneamiento, su demanda es de 55 m<sup>3</sup>/s, siendo extraídas de aguas superficiales y subterráneas, con un 18,4% y 14,9% respectivamente (Escenarios Hídricos 2030, 2018).

### 2.1.1 Cambios, efectos y proyecciones del cambio climático en Chile

En los siguientes puntos se expresa un resumen de los cambios y efectos de las proyecciones de las variantes climáticas en promedio para Chile, de acuerdo con una estimación comunal.

#### Climatología

Para estimar las proyecciones de la temperatura y precipitación futuras, el informe elaborado por la Universidad de Chile denominado “Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980–2010) y proyección al año 2050” (Santibáñez Quezada, Santibáñez Varnero, & González, 2016) utilizó una línea base en el período comprendido entre los años 1980 y 2010. En cuanto a las proyecciones de temperatura, se calcularon sus medias para el período estival (diciembre, enero y febrero) e invernal (junio, julio y agosto), además de considerar temperaturas mínimas y máximas para los meses de enero y julio. En cuanto a

precipitaciones se estimaron anualmente la más baja y alta por comuna. Considerando el RCP (Representative Concentration Pathways) más desfavorable proyectándose estas variables hacia el año 2050.

Según los registros de temperatura en el valle central y en la cordillera de los andes, se observan aumentos, señalando que en un futuro se incrementaría la temperatura en todo el país, con superioridad en la zona norte de Chile. Considerando la línea base (1980 - 2010) y proyección al año 2050 el informe estima que para el año 2030 ocurra un aumento de por lo menos 0,5°C para la zona sur y austral, y 1,5°C para el norte y el altiplano de acuerdo con el escenario RCP 8,5. Este escenario parece ser el más probable y la condición más desfavorable según (Moss, Edmonds, & et, 2010) y será utilizando a lo largo del estudio. En lo que concierne a las lluvias existe una gran disminución en estas en la zona centro y sur, proyectando que en el 2030 las lluvias disminuirán entre 5% y 15% para estas zonas, que van de la cuenca del río Copiapó en la zona norte, hasta la cuenca del río Aysén en la Patagonia chilena, por lo cual la cuenca del Elqui se ve afectada (Fundación Chile, 2018).

### Eventos climáticos extremos

Se proyecta que los eventos de sequía aumenten significativamente, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XXI, con más de 10 eventos de sequía proyectados en los 30 años para fines del siglo. Como resultado de tales fenómenos, las pérdidas ambientales, sociales y económicas del país podrían volverse enormes, alcanzando el 1,1% del PIB anual para 2100. (Fundación Chile, 2018)

En cuanto a los fenómenos de cambio climático a nivel nacional, para el 2050 se proyecta que el país sea más cálido, con menos lluvias, más propenso a tormentas y con más días nublados (ODEPA.a., 2013). Además, se producirán una serie de cambios en el paisaje por la reducción de los recursos hídricos y el desarrollo de las zonas secas, lo que provocará un desplazamiento creciente de algunos tipos de cultivos de las regiones centrales hacia el sur.

## 2.2 GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO

Los informes meteorológicos de la región sugieren que las precipitaciones cayeron un 30% en el siglo XX, con sequías que duran de tres a seis años registradas cada década. (Fundación

Chile, 2018). En la Figura 2-1. Se expone un esquema de la situación de los recursos hídricos en la cuarta región del país, en la que se enmarca la zona de estudio.

El desarrollo de actividades agrícolas en la región es importante para el país. Sin embargo, estos fértiles valles se ven fuertemente afectados por la escasez de agua y condiciones de aridez de los suelos, lo anterior afecta también a sus poblaciones, haciéndolas dependientes de los recursos pluviales anuales. Al igual que a nivel nacional, las actividades productivas en la región tienen una creciente demanda de recursos hídricos.

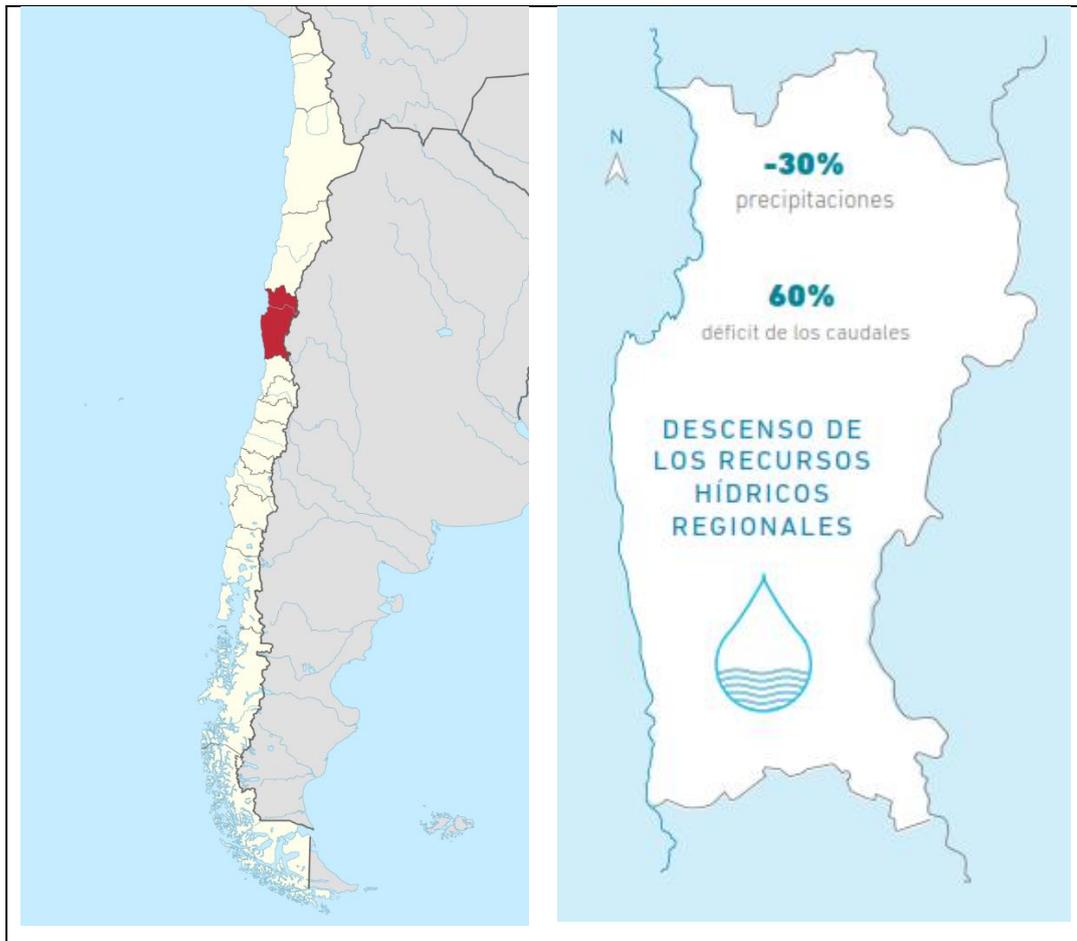


Figura 2-1. Descenso de los recursos hídricos en la región de Coquimbo.

Fuente: (Fundación Chile, 2018).

Lo anterior ha exacerbado el desbalance que existe entre la oferta hídrica y los usuarios del agua, principalmente por la escasez de agua en muchas zonas con derechos de agua ya otorgados. Sumado a lo anterior, la variabilidad de los recursos de un año a otro es un dato relevante.

El 82% del consumo de agua se concentra en la agricultura, con una alta proporción de pérdidas por falta de tecnología e infraestructura en los sistemas de riego. Esta es una brecha que debe cerrarse para preservar los recursos según lo indicado en (Fundación Chile, 2018).

La escasez de agua y su distribución en la región afecta severamente el uso doméstico del agua o el consumo humano. Actualmente, en muchos sectores, el agua se distribuye a través de camiones de aljibe cada 7 o 15 días, dependiendo del sistema de almacenamiento existente en los diferentes lugares y la distancia que se debe recorrer para llegar al destino. En todo caso, hay que tener en cuenta que, además de la sequía, la distribución de agua en camiones cisterna es una característica inherente a la región debido a la dispersión de la población y la configuración geográfica de la zona de abastecimiento de agua. Esto limita la implementación de eventuales soluciones para paliar la escasez de agua, como lo es la instalación de sistemas de agua potable rural (GORE.A, C., 2015).

En la región de Coquimbo, hay algunos sectores que se encuentran en estado crítico y no alcanzan siquiera el umbral mínimo de agua de 20-25 litros/persona/día establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Las cuencas de los ríos Los Choros, Limarí, Quilimarí cercanas al Elqui, y esta última presentan actualmente grandes lagunas hídricas, presentando el 78% de los acuíferos analizados reducciones significativas (Escenarios Hídricos 2030, 2018).

La Dirección General de Aguas (DGA), es un organismo del Estado chileno encargado de promover la gestión y administración de los recursos hídricos, enfrenta el desafío de planificar el desarrollo de los recursos hídricos en el marco de la sostenibilidad de la asignación del agua, la universalidad del interés público y la eficiencia. Una buena gestión puede suplir las diversas necesidades del país en épocas de escasez de agua. Es por las razones anteriores que se han desarrollado varios planes estratégicos de gestión hídrica en todo el país.

Actualmente se encuentra aprobada la modificación Ley 21.435 *“Reforma El Código De Aguas - Ministerio De Obras Públicas”*, *Publicación: 06-ABR-2022, Promulgación: 25-MAR-2022*, la cual hace alusión a los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica, modificándolos a *“Planes Estratégicos de Recursos Hídricos en Cuencas”*.

*“97. Agregase el siguiente Párrafo 6, a continuación del artículo 293, que comprende los artículos 293 bis y 293 ter:*

## 6. Planes Estratégicos de Recursos Hídricos en Cuencas

*Artículo 293 bis.- Cada cuenca del país deberá contar con un Plan Estratégico de Recursos Hídricos tendiente a propiciar la seguridad hídrica en el contexto de las restricciones asociadas al cambio climático, el cual será público. Dicho plan será actualizado cada diez años o menos” (Ministerio de Obras Públicas, 2022, p.28).*

La anterior modificación tiene como finalidad subsanar ciertas brechas administrativas que sugiere realizar una gobernanza adecuada a nivel nacional. Si tomamos como referencia lo realizado en España, estos planes estratégicos se asemejan al objetivo que tienen los Planes Hidrológicos de cuenca comandando por el Plan Hidrológico Nacional español (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.).

El Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) de la cuenca del río Elqui ha compilado una serie de acciones en diferentes etapas (corto, mediano y largo plazo) dirigidas a diferentes servicios públicos y actores privados involucrados en la gestión del agua, con foco en aquellos a cargo de la propia Dirección General de Aguas (DGA). El PEGH es una hoja de ruta con la que se espera abordar la problemática del agua en la cuenca del río Elqui, con una mirada integral de la relación entre los participantes en cuanto al uso, consumo y gestión del agua, priorizando el consumo humano y teniendo en cuenta el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua, apoyándose en el modelo de aguas superficiales-subterráneas y las opciones de gestión analizadas en su desarrollo.

El plan estratégico para la cuenca del río Elqui ha servido para comprender la situación actual de oferta y demanda de agua, establecer un balance y sus proyecciones hídricas al 2030 y 2050, diagnosticando los antecedentes, la infraestructura y las instituciones para la toma de decisiones sobre los recursos hídricos y proponiendo una combinación de acciones de la DGA y de terceros público-privados para satisfacer la demanda de agua y adaptarse o mitigar el cambio climático.

### 2.3 EXPERIENCIA INTERNACIONAL DE LA GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La gestión de aguas residuales es un tema que los últimos años ha tomado más importancia a nivel internacional, según (Fundación Chile, 2018) el reúso de las aguas tratadas provenientes

del uso urbano, son parte de una estrategia que tiene por objetivo usar más de una vez el recurso hídrico, sometiendo a dicho caudal a tratamientos que permitan mejorar su calidad para utilizarla en diversos usos y actividades productivas de acuerdo con sus requerimientos.

Otro de los beneficios mencionados por (Fundación Chile, 2018) es la de disminuir del impacto de su descarga en los medios, que ayuda a mejorar la calidad ambiental de las fuentes receptoras.

La práctica de reuso de aguas residuales es usual en países que han desarrollado sistemas eficientes y adecuados para tratar las aguas y mejorar su calidad. Dentro de los principales países que cumplen con lo antes mencionado están los siguientes: Singapur, Estados Unidos, Australia e Israel. Estos países poseen una amplia experiencia debido al estrés hídrico de zonas áridas en sus territorios. Para efectuar este desarrollo, han generado cambios en su marco regulador y nuevas normativas de calidad, así como mayor financiamiento público y privado (Fundación Chile, 2018).

El uso más utilizado en la experiencia de internacional es el agrícola, específicamente el riego de cultivos, aunque también se utilizan en sistemas urbanos de infiltración de aguas para riego urbano, recarga de aguas subterráneas, procesos industriales, entre otros. Cabe destacar que son prohibidos para el consumo humano.

En el mundo se generan aproximadamente 680 Hm<sup>3</sup> al día de aguas residuales, de los cuales solo un 4% obtiene un tratamiento adecuado, si consideramos las calidades requeridas de uso para su reuso. A pesar de ello, desde el año 2000 se ha generado un avance en este sentido, con una tasa de aumento por año de 2 Hm<sup>3</sup> al día en condiciones adecuadas. (Global Water Intelligence, 2010).

De acuerdo con (Reznik, 2017), Israel es el país con un mayor porcentaje de agua tratada, proyectando un 85% de la reutilización para el año 2040, para emplear en agricultura. Por otro lado, Arabia Saudí utiliza el 65% de aguas tratadas para fines productivos según datos de 2015. Australia reutiliza un 30% y Estados Unidos un 8% de aguas residuales tratadas con fines productivos, principalmente agrícolas.

En los siguientes puntos se describen diversos usos que se dan a las aguas tratadas en diferentes lugares del mundo, según (Fundación Chile, 2018).

- En Australia, en el estado de Victoria el agua tratada regenerada es utilizada en riego de viñedos, hortalizas, además de jardines urbanos.
- En Israel y Perú se aplican a humedales verticales, que son utilizados para regar jardines verticales, además de y árboles frutales.
- En la Ciudad de México se usan para regar áreas verdes y recarga de lagos para recreación, además de los usos en agricultura.
- En Jordania se utilizan predominantemente para el riego de forraje para animales, del típico riego de palmeras y olivas.

Además de ser utilizadas generalmente en agricultura o riego jardines urbanos, el reúso de aguas recicladas se incorpora también a usos industriales, de acuerdo con lo indicado en (EPA, 2012), aproximadamente un 19%. También se aplican al uso urbano de agua potable de manera indirecta (uso doméstico y no consumo), considerándose un 8% de uso.

Por otro lado, según (EPA, 2012) existe un uso de dichas aguas tratadas en la recarga de aguas subterráneas en países con un importante estrés hídrico: Israel, África del Sur, Alemania, Bélgica, Australia, Namibia, India, Italia, México, China, Barbados y Chipre. La idea realizar esta recarga es acumular agua para ser utilizada a posteriori en los usos que se consideren con déficit de acuerdo con la gestión hídrica de cada país. Por último, la prevención de intrusión salina en zonas costeras es un aporte que pueden generar estas inclusiones de aguas tratadas al sistema. A pesar de tener diversos usos las aguas residuales han sostenido un crecimiento únicamente en el sector agrícola, por lo que la presente investigación apuntaría a este sector mayormente consolidado.

De acuerdo con los antecedentes antes presentados y la proyección internacional de la reutilización de las aguas residuales tratadas, se destaca la importancia de avanzar en el reúso de aguas residuales en Chile. A continuación se expone la experiencia en España como antecedente de experiencia a observar para Chile.

### 2.3.1 Reutilización de aguas residuales tratadas en España

Como se mencionó anteriormente, España mantiene una gestión hídrica a través de planes hidrológicos de cuenca distribuida geográficamente en demarcaciones hidrográficas, que han incluido en su reglamento el uso de aguas recicladas. Para mantener en buen estado las masas de aguas subterráneas se han incluidos caudales de reutilización de agua, como también de agua desalada para abastecimiento urbano y riego agrícola, disminuyendo así, la presión hídrica sobre las masas de agua con mayor estrés hídrico (Asociación española de desalación y reutilización, 2022).

En las islas Canarias y las islas Baleares el agua reciclada ha tenido una importancia significativa, debido a la alteración hidrológica que han sufrido durante décadas en periodos de excesivo turismo, derivada del aumento de consumo de aguas de acuíferos. Para solucionar esta necesidad se han desarrollado técnicas que permiten recargar las aguas subterráneas de manera artificial, siendo estas de una calidad óptima para su infiltración. Un caso similar ocurre en la capital de Cataluña, donde se han desarrollado proyectos para aumentar la reserva y evitar la intrusión salada en el Delta del Llobregat, siendo este acuífero una reserva importante para Barcelona, provocado por la expansión que ha tenido la ciudad desde los años 60 (Asociación española de desalación y reutilización, 2022).

#### Aspectos jurídico-administrativos

La legislación española actual incorpora la DMA del Parlamento Europeo y directivas derivadas, incluyendo el texto refundido de la Ley de Aguas, el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación. También cabe mencionar las Directivas 91/271/CEE y 98/15/CE, conforme al Real Decreto (RD en adelante) Ley 11/1995, el Reglamento de la Administración Pública del Agua y Planificación Hidrológica (RD 2116/98) en el que se establecen los primeros reglamentos aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas generadas por las diversas actividades productivas, económicas y domiciliarias que realizan vertido a la red municipal de saneamiento como lo establece la Ley Orgánica 8/1980, con ello las comunidades autónomas tributan la prevención de saneamiento, explotación y conservación de las infraestructuras destinadas al tratamiento o depuración de aguas servidas. El fin de este

tributo es dar un carácter ecológico, disminuyendo la contaminación y preservando el medio ambiente (Rico Amorós, 2016).

Los municipios son los responsables, como administración local, de las aguas servidas tal lo precisa en el artículo 26° de la Ley de Bases de Régimen Local. Sin embargo, esta administración se desarrolla en conjunto a las comunidades autonómicas, debido a los niveles administrativos, económicos y de gestión involucrados.

### Tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con lo indicado por (Pucara Aedo, 2022) para realizar el tratamiento en España de aguas servidas se utilizan las siguientes técnicas de tratamientos:

- Tratamiento primario: separación de sólidos voluminosos utilizando barreras físicas, admitiendo partículas menores para su sedimentación.
- Tratamiento secundario: biodegradación de materia orgánica a través de microorganismos. Dentro de estos tratamientos se distinguen los filtros percoladores, lodos activados y lagunas estabilizadoras.
- Tratamiento terciario: depuración fisicoquímica, que incluye filtración de arena, desinfección ultravioleta, también se incluyen procesos avanzados de ultrafiltración o filtración por membranas de osmosis inversa o electrodiálisis reversibles, en el caso de aguas salobres.

Todos los procesos requieren un adecuado manejo de residuos, en el caso de los lodos activados y su adecuada disposición, además de la sal muera generaran en los procesos de membrana.

Otro punto que destaca (Fernandes Moreira, 2011) sobre las aguas residuales, es la transmisión de enfermedades a través de su mala gestión, siendo un problema recurrente en todo el mundo, principalmente en países en vías de desarrollo. Es por lo anterior que un buen tratamiento de aguas servidas es fundamental para preservar el entorno y los ecosistemas naturales.

### Causas del bajo éxito de la reutilización en España

Existen diversos estudios para el desarrollo de la utilización de aguas generadas, sin embargo, en España algunos sectores se resisten a su incorporación. Según (Salgot, 2020), no se ha provocado un éxito importante en estos temas, algunas causas que determinan esto se presenta en los siguientes puntos:

- La demora en la implementación de normativa estatal, promulgada en 2007 con deficiencias de carácter técnico.
- Implementación de reglamentación poco adecuada a España, debido a adaptación de leyes y normas extranjeras.
- Fundamentalismo de académicos y expertos a lo largo de los años, emanado de la poca experiencia con el agua tratada.
- La demora en la creación de reglamento a nivel europeo.
- Escasa voluntad política comprometida en potenciar la reutilización.
- La crisis económica frenó proyectos de recarga de acuíferos debido a su alto coste.
- Durante la última década, los empresarios han desestimado la reutilización aguas residuales debido a su poco beneficio económico, aunque esto ha ido cambiando en los últimos años.

Recientemente, en mayo de 2020 se publicó el “Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua urbana depurada en usos agrarios”. Este reglamento establece algunos parámetros unificados y armónicos para dar garantías de seguridad a los regantes sobre la reutilización de aguas regeneradas en el sector agrícola (Gordillo, 2023).

La experiencia antes descrita sirve como un antecedente para considerar en el fomento de la implementación del reúso de aguas residuales en Chile y justificar el presente trabajo. Para este caso de estudio se pretende entregar una posible solución de adaptación al cambio climático, el reusó de aguas en la región de Coquimbo (Chile).

## 2.4 ANÁLISIS DE GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN CHILE Y LA REGIÓN DE COQUIMBO

Chile ha experimentado en los últimos años un creciente interés en el uso de las aguas servidas tratadas, debido a que las actividades productivas y domiciliarias del humano ha ejercido una constante presión a la oferta hídrica, sumado a ello el cambio climático, tal y como se explica en el subcapítulo 2, por lo que estas nuevas fuentes de agua parecen indispensables para detener esta situación.

Actualmente estas aguas tratadas provenientes de los sistemas sanitarios urbanos, en general, descargan sus aguas a cuerpos superficiales. En la ciudad más poblada de Chile, Santiago, se utiliza un total estimado de  $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas recicladas en riego de cultivos, como árboles frutales y uva vinífera (Fundación Chile, 2018). Sin embargo, este riego no está regulado por normativas. En las regiones áridas-desérticas del norte de Chile, como lo es la región de Coquimbo, se realiza reutilización de aguas servidas, debido a su déficit hídrico. En la primera región de Tarapacá se reciclan más de 30 l/s para regar el sector agrícola en las localidades de Huara, Pozo Almonte, La Tirana y Pica. Por otro lado, en la segunda región de Antofagasta desde el año 1971 en el sector industrial y regadío se reúsan más de 120 l/s. (Godoy Bravo, 2021). En la tercera región de Atacama, la sanitaria Aguas Chañar vendió en el año 2008 las aguas servidas tratadas a la Compañía Minera Candelaria, con un caudal estimado de 175 l/s, el cual fue suministrado a través de acueductos y estanques de acumulación (Fundación Chile, 2018).

Uno de los proyectos reglamentados de reúso se encuentra en Cerrillos de Tamaya, en la cuarta región de Coquimbo, donde se reutiliza el efluente de la PTAS de dicho sector, que incluye un tratamiento secundario de lodos activados, para ser utilizado en el riego agrícola. El efluente es de un poco más de 6 l/s, proveniente de las aguas domiciliarias de aproximadamente 2.900 habitantes. La PTAS de Cerrillos de Tamaya cumple con la norma de emisión establecida en la Tabla 1 del Decreto Supremo 90/2000, que reglamente los vertidos de aguas residuales a masas de agua superficiales y marinas (Fundación Chile, 2018).

El proyecto de reúso de aguas servidas “Nueva Planta de Tratamiento de Agua Servidas para reúso en Antofagasta” se consagra como el más reciente para ser ejecutado con su evaluación

ambiental aprobada. Se construirá una PTAS, en donde actualmente existe un sistema de pretratamiento de las aguas servidas de 120 l/s, cercano al sector urbano de Antofagasta, que es utilizado para el emisario submarino (ES en adelante) que vierte un caudal estimado de 1.500 l/s. Esta PTAS nueva contempla la construcción de 3 módulos de tratamiento, con capacidad de 300 l/s. El nuevo proyecto contempla el transporte de aguas servidas tratadas por 14 km de longitud en el primer tramo (desde antigua PTAS), considerando cuatro Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS en adelante). Luego se presente conducir las aguas tratadas desde la nueva PTAS hacia el sector de La Negra (barrio industrial) y otro tramo hacia el sector de Mantos Blancos, con una longitud de 27 km para cada tramo (Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A., 2020).

#### 2.4.1 Aspecto jurídico-normativo chileno

En el estudio (Agua Advise, 2014) se ha realizado una revisión asociada a los reglamentos y normativas sobre la reutilización de aguas servidas. Éstas definen aspectos más específicos sobre la calidad de las aguas, hasta los oficios otorgados por los organismos públicos con competencia en materia de aguas. A continuación, se resumen las normativas:

##### Normas Generales

- Código de aguas.
- Código Sanitario.
- Ley General de Servicios Sanitarios.
- Ley General de Bases del Medio Ambiente.

##### Reglamentos

- Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental.
- Determinación de materias que requieren autorización sanitaria expresa.
- Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano.
- Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo.
- Establece normas para la aplicación del artículo 75 del código sanitario.
- Reglamento de la Ley de Servicios Sanitarios.

### Normas Chilenas

- Normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- Norma Chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- Agua potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación – Terminología, clasificación y requisitos generales.
- Agua potable – Parte 1 Requisitos.
- Agua potable – Conducción, regulación y distribución.
- Establece normas sobre ejecución de obras de riego por el Estado.
- Establece normas sobre derechos de aprovechamiento de aguas.

### Oficios y Resolución de Calificación Ambiental (RCA en adelante)

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).
- Dirección General de Aguas (DGA).
- Ministerio de Medio Ambiente.
- RCA Coquimbo.
- RCA La Serena.

### [Ley 20.150 sobre reúso de aguas servidas](#)

Hasta la revisión de (Agua Advice, 2014) no existían Leyes que dictaminaran sobre el reúso de aguas servidas o residuales, solo se identificaban normativas específicas dependientes del destino de su tratamiento y posterior uso o vertido, identificando cual organismo era el competente para su evaluación y restricción.

No fue hasta el 1 de febrero 2018, a través del Ministerio de Salud, que se promulgó la Ley 20.150, que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. A pesar de haber sido promulgada, hasta 2021 no ha podido estar en práctica debido a la falta de aprobación de reglamentos que detallen sus exigencias específicas. A pesar de ser un avance jurídico, esta Ley no recoge todas las experiencias internacionales, ya que no incluye el reúso de “aguas negras”, sino que se limita al reúso de “aguas grises” de uso domiciliario. Lo anterior no permite utilizar todo el potencial de aguas servidas para mejorar la oferta hídrica. Sin embargo, es un avance en esta materia.

## 2.4.2 Infraestructura de una planta reutilización de aguas en Coquimbo

Se realizó estudio preliminar de la instalación de plantas de reutilización de aguas servidas en la región de Coquimbo (Agua Advise, 2014), el cual sirve como antecedentes relevantes para considerar en el caso de estudio.

### Descripción del proceso de reutilización

En la Figura 2-2 se presenta un esquema donde se visualiza el proceso que debe llevar una planta de reutilización de aguas según (Agua Advise, 2014), además de incluir los tipos de tratamientos genéricos que se debiesen considerar.

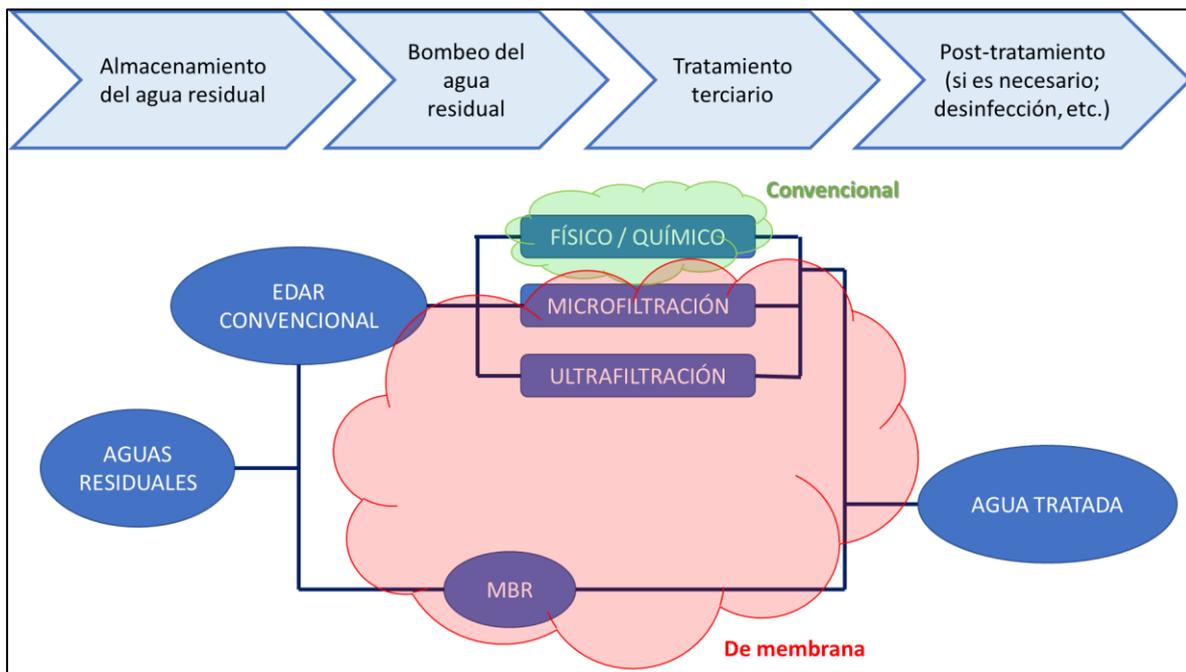


Figura 2-2. Esquema del proceso y tratamientos para la reutilización de aguas residuales.

Fuente: Elaboración propia en base a (Agua Advise, 2014).

### Tipología de plantas de reutilización.

En la Tabla 2-1. se presenta un resumen de algunos tipos de plantas, según sus instalaciones, presentadas por el estudio de (Agua Advise, 2014), que permiten diferentes usos.

Tabla 2-1. Características y usos de aguas tratadas según tipo de planta.

Tipo	Características Principales de calidad	Usos
Tipo 1	Ausencia de E. coli en el agua tratada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torres de refrigeración y condensadores evaporativos (uso industrial).</li> <li>• Uso residencial (Riego de jardines privados y recarga de cisternas).</li> <li>• Recarga de acuíferos mediante inyección directa (uso ambiental).</li> </ul>
Tipo 2	Valores máximos de E.coli de $\leq 100$ UFC/100 ml.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servicios urbanos.</li> <li>• Riego de cultivos para consumo.</li> <li>• Aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.</li> <li>• Riego de campos de Golf.</li> </ul>
Tipo 3	Valores máximos de E.coli de $\leq 1000$ UFC/100 ml.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cultivos leñosos ornamentales, no alimentarios.</li> <li>• Aguas de proceso y limpieza y otros usos industriales.</li> <li>• Estanques, caudales ornamentales con acceso prohibido al público.</li> <li>• Riego de bosques, zonas verdes no accesibles al público, silvicultura.</li> </ul>
Tipo 4	Sin límites bacteriológicos	Riego de bosques, zonas verdes no accesibles al público, silvicultura.
Tipo 5	Eliminación de Sales	Válido para todas las calidades exigidas, ya que el efluente es de máxima calidad.

Fuente: Elaboración propia en base a (Agua Advise, 2014).

Los antecedentes presentados hasta ahora son datos e información de entrada que permitirá abordar de mejor manera el caso de estudio en la cuenca del río Elqui.

En el siguiente capítulo se presentan las metodologías de análisis y cálculo para evaluar hidroeconómicamente el sector de estudio.

### 3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

En el siguiente apartado se describe resumidamente las metodologías que se propone para realizar el análisis de adaptación al cambio climático en referencia a la inclusión de un sistema de gestión de recursos hídricos considerando la reutilización de aguas residuales.

Dentro de los puntos principales que se consideran en la metodología del presente estudio se resumen en los siguientes:

1. Caracterización y análisis de antecedentes de la cuenca.
2. Análisis y selección de PTAS del sistema Elqui
3. Cálculo de las aportaciones futuras de reutilización de aguas y selección de ubicación para su inclusión.
4. Modelos de circulación general obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio procedentes de modelos de cambio climático.
5. Implementación de un modelo gestión de recursos hídricos (empleando el software WEAP).
6. Cálculo hidroeconómico de los resultados de la gestión.

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo en el que se esquematiza la metodología general propuesta.

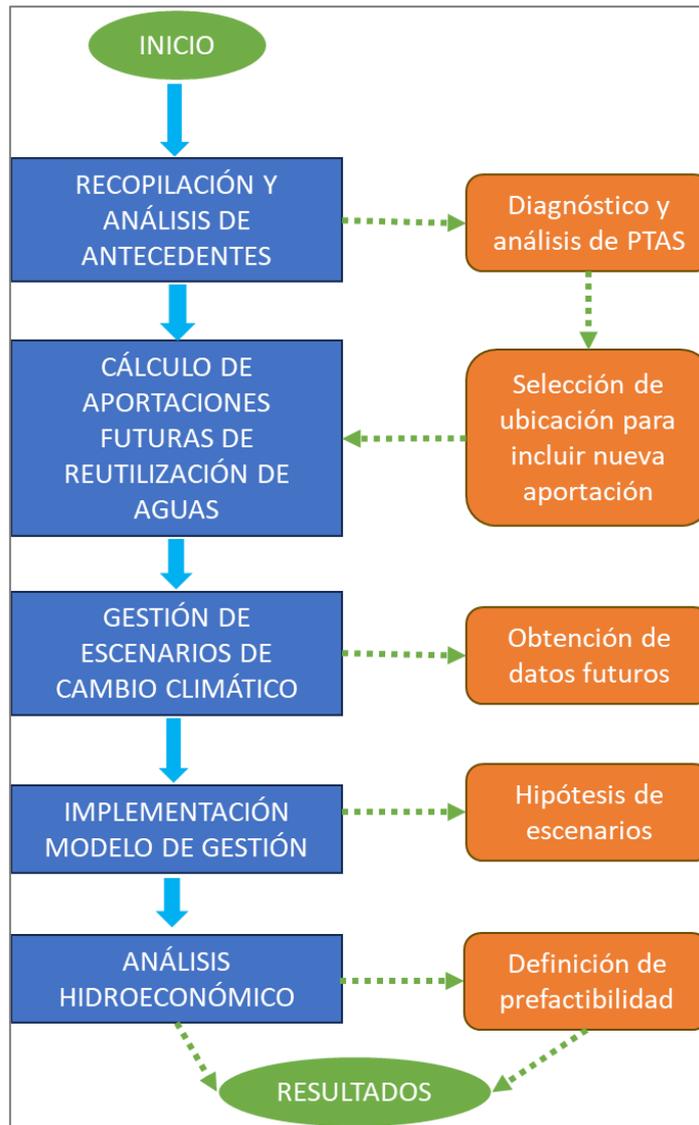


Figura 3-1. Diagrama de flujo del proceso metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE LA CUENCA DE ESTUDIO

La recopilación de antecedentes se hará considerando las características físicas, climática e hídricas de la cuenca, con la revisión y análisis de los datos relevantes a considerar para los datos requeridos en la generación del modelo y evaluación hidroeconómica.

Además de lo anterior se expondrán resultados relevantes para determinar los sectores con mayor estrés hídrico, analizando el balance hídrico de la cuenca, calculado en el modelo acoplado del PEGH, que contempla el uso conjunto de sus componentes superficial y subterránea.

### 3.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PTAS DEL SISTEMA ELQUI

Para realizar este análisis se toman en cuenta las cualidades de las plantas de tratamiento en el sistema Elqui desde la parte alta (pie de Cordillera de los Andes) hacia la desembocadura en el mar (océano Pacífico), se emplea para el análisis Sistemas de Información Geográfica (SIG) disponibles. El motivo del análisis es obtener un diagnóstico certero de las cantidades de agua que pueden reutilizarse, en qué sectores de la cuenca son más factible de instalar infraestructura de tratamiento, considerando su aportación, economía y afección al medio ambiente. Para lo anterior se estudiarán los subsistemas de la cuenca del Elqui, considerando los siguientes aspectos:

- Tipo de tratamiento.
- Medio receptor.
- Tipo de oferta probable.
- Caudal máximo del día.
- Caudal medio mensual.
- Caudal máximo puntual.

Luego del análisis se realizará la selección de la PTAS más adecuada.

### 3.3 CÁLCULO DE LAS APORTACIONES FUTURAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS Y SELECCIÓN DE UBICACIÓN PARA SU INCLUSIÓN.

Luego de definir el sector y la PTAS a utilizar, se presentan los antecedentes de dicha planta para calcular el caudal proyectado a 2050. Para este cálculo se consideran la proyección lineal de los usuarios del sistema o clientes de población urbana de la empresa Sanitaria y sus facturaciones de alcantarillado según el siguiente esquema presentado en Figura 3-2.

Una vez estimado el caudal proyectado se procede a determinar las áreas, sectores, usuarios donde se pretende incluir la nueva oferta hídrica. Para ello se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de los canales de regadío importantes del sistema, y que por ubicación y características son factibles de recibir los nuevos caudales de reutilización.

Dentro de los parámetros utilizados para esta determinación tenemos los siguientes puntos:

- Largo Canal
- Ribera
- Sector
- Caudal máximo
- Acciones de derechos de agua

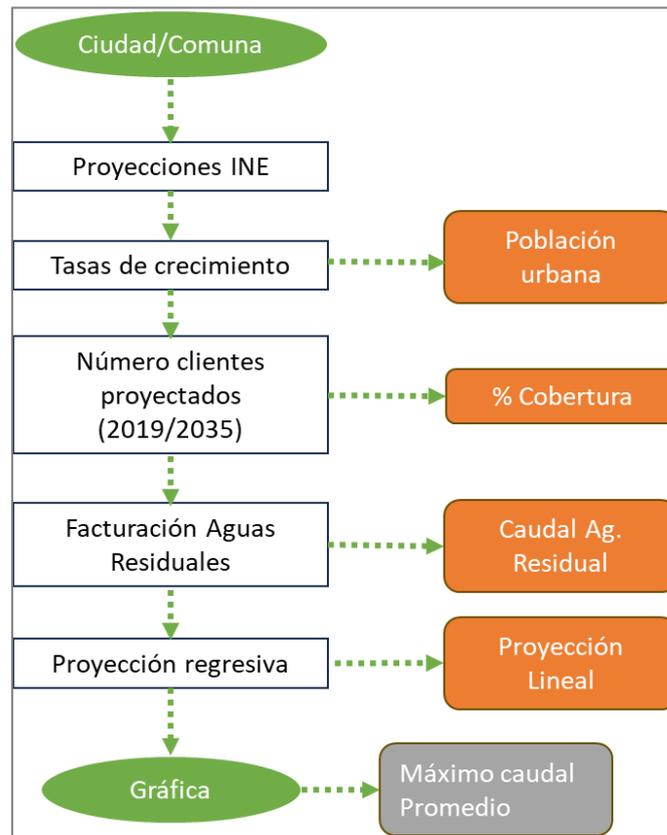


Figura 3-2. Esquema de cálculo de caudal de aportación.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente a la ubicación seleccionada se realiza una búsqueda de información dentro del Modelo WEAP del PEGH para extraer indirectamente, con los resultados de la modelización, los datos requeridos del canal seleccionado que permita conocer las zonas de riego involucradas en sus ramales.

### 3.4 MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y OBTENCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.

Para evaluar los impactos generados en los sistemas de recursos hídricos se usan modelos de circulación general (MCG). La obtención de datos futuros se basa en el estudio de los datos obtenidos desde la Dirección General de Aguas, específicamente en la “Actualización del balance hídrico nacional (Dirección General de Aguas (DGA), 2017c)”, que se complementan con lo realizado en el PEGH. En primera instancia se considerará la selección de modelos de circulación general (MCG) para el cambio climático, tomando en cuenta la respuesta de los modos globales en sentido regional, su sensibilidad climática, además de sus cambios regionales. Se considera para ello la línea base del escenario global RCP 8,5 en ventana 2030-2060, periodo futuro considerado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (Dirección General de Aguas (DGA), 2018c).

Se han seleccionado los mismos cuatro modelos que los empleados en el PEGH, que realiza un análisis de los modelos disponibles y una selección motivada del mismo, evaluando el presente trabajo la sensibilidad climáticos de estos modelos seleccionados. Luego se describirán los datos futuros obtenidos en el PEGH para la precipitación, temperatura y caudales, considerando los periodos históricos, los cuatro modelos seleccionados y sus estadísticas que representan la robustez de sus datos. Finalmente se dan a conocer los datos de precipitación y temperatura en para la zona de estudio, considerando los dos escenarios de cambio climático, con sus modelos (MCG) seleccionados para dicha modelación.

### 3.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

La simulación hidrológica, de gestión de recursos hídricos e hidroeconómica del presente trabajo se basa en la creación de un modelo generado en la plataforma software WEAP, utilizando como base la metodología, generación y recopilación de datos de lo realizado en el PEGH del Elqui.

#### 3.5.1 Descripción del software WEAP

La herramienta WEAP es utilizada para planificar íntegramente los recursos hídricos en base a escenarios de gestión. Este software fue creado por Stockholm Environment Institute (SEI).

Constituye una ayuda de planificación, utilizando un balance entre oferta y demanda hídrica a nivel de subcuenca, basada en modulación física en un sistema de distribuido espacial y temporalmente.

Además de ser una herramienta para modelar sistemas de recursos hídricos, en la actualidad incluye módulos de cálculo de precipitación-escorrentía, calidad de aguas y aguas subterráneas acoplado con Modflow (USGS) u otros. Estas herramientas no serán utilizadas en el presente trabajo.

El balance hidrológico generado en WEAP numéricamente se genera en base a las siguientes ecuaciones:

$$z_{1max} \frac{dz_1}{dt} = \left[ P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5z_1 - 2z_1^2}{3} \right] - P_e(t) z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_2(1-f) Z_1^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$z_{2max} \frac{dz_2}{dt} = K_2(1-f) Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$P_e$ : precipitación más derretimiento

$f$ : Dirección preferencial del flujo

Para calcular la evapotranspiración ( $ET_0$ ) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia.

$R_n$ : Radiación neta.

$G$ : Densidad de flujo de calor del suelo.

$T$ : Temperatura media diaria.

$u_2$ : Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

$e_s$ : Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

$e_a$ : Presión de vapor.

$\Delta$ : Pendiente de la curva de la presión de vapor.

$\gamma$ : Constante psicométrica

El método antes mencionado se implementa en WEAP con los siguientes supuestos:

- La ecuación se estandariza para pasto de 0,12 m de altura y de resistencia superficial de 69 s/m.
- El albedo varía dentro de un rango de 0.15 a 0.25, como función de la cobertura de nieve.
- El término G se asume nulo.

En la siguiente figura se presenta el Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea

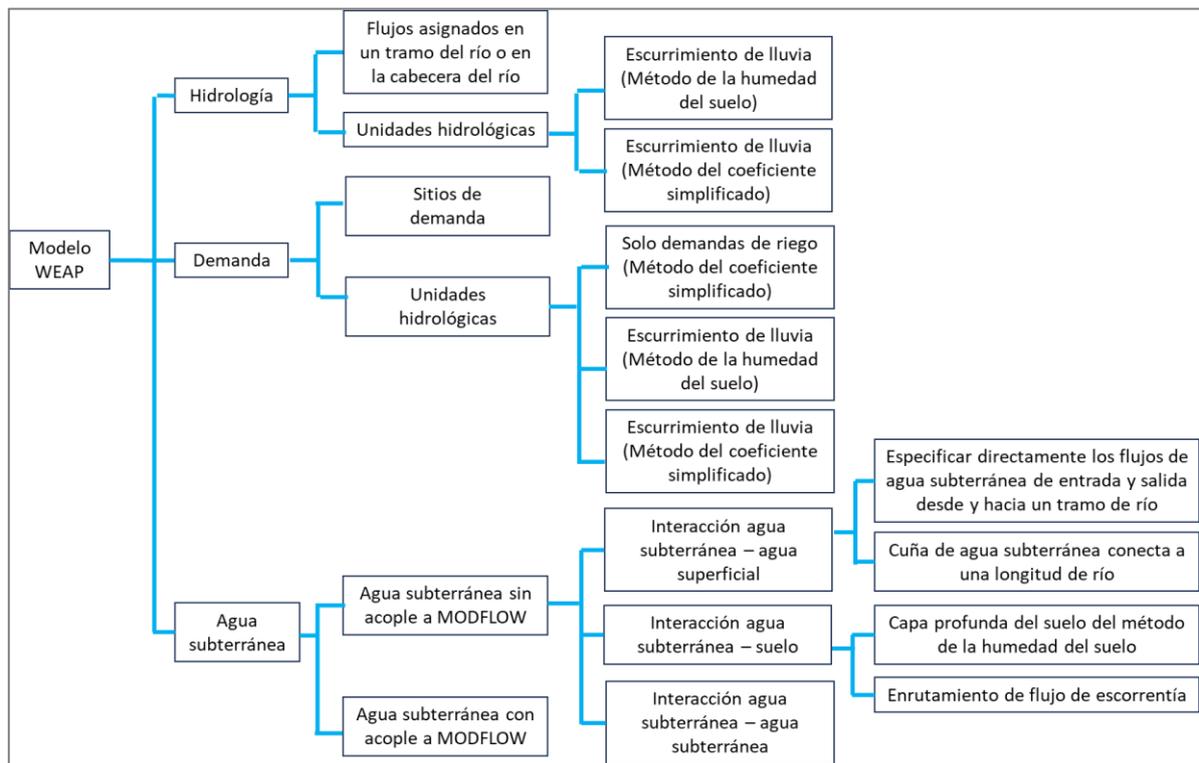


Figura 3-3. Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología.

Fuente: Anexo F – Aspectos Metodológicos del Plan de Cuenca (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

### 3.5.2 Modelos de Circulación General

Se ha empleado el documento “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (Dirección General de Aguas (DGA), 2018c) para la selección de los modelos de circulación general (MCG en adelante). Dentro de los puntos a considerar para dicha selección se exponen a continuación las tres principales:

- Respuesta de los modelos globales de variabilidad climática en sentido regional: considerando la interpretación los modelos señales como El Niño/Oscilación del

Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio Sur (SAM), ambos asociados a la precipitación.

- Sensibilidad Climática: sensibilidad asociada a concentraciones de CO<sub>2</sub> y temperatura, tomando en cuenta la respuesta de los modelos ante la variabilidad de estas concentraciones.
- Cambios regionales: modelos que abarquen la variabilidad de las forzantes de precipitación y temperatura para el escenario RCP 8.5 en la ventana 2030-2060 respecto de la línea base.

Además de lo anterior se toma en cuenta los criterios de eficiencia descritos por (Moriasi, 2007) en cuanto a la clasificación de modelos como se muestran en la siguiente figura.

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 15$	$\text{PBIAS} < \pm 25$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 30$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS} < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} < \pm 55$	$\pm 40 \leq \text{PBIAS} < \pm 70$
Unsatisfactory	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 70$

Figura 3-4. Clasificación de modelos de acuerdo con distribución de según indicadores como NSE y PBIAS.

Fuente: (Moriasi, 2007)

### 3.5.3 Obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio

La obtención de los datos climáticos de precipitación temperatura y caudales se realiza luego de la selección de MCG seleccionados incluidos en el modelo WEAP del PEGH. Utilizando la metodología de modelación acoplada WEAP-Modflow del PEGH y luego de correr el modelo se obtienen los datos específicos de la zona de estudio de acuerdo con las topologías requeridas.

### 3.5.4 Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón

Este nuevo modelo es diferente al realizado en el PEGH, ya que no contempla el acople con Modflow, a pesar de utilizar los datos de resultado para generar sus datos de entrada. El modelo WEAP se basa en considerar al canal Bellavista como un trasvase desde el sistema del río Elqui hacia el estero El Culebrón. Este modelo tiene como objetivo simplificar la gestión hídrica del sector de estudio, pudiendo ser una herramienta de uso a nivel de usuario y de

menor tiempo de resolución para la toma de decisiones. Además que los datos de entrada pueden ser modificados rápidamente, sin tener que realizar un reanálisis complejo de todo el sistema que conlleve tiempo, expertiz y sofisticación computacional. El modelo se traduce finalmente en cuatro escenarios de gestión, considerando dos escenarios de cambio climático (CSIRO y CCMS4) y dos escenarios de oferta hídrica, uno sin inclusión de agua reutilizada y otro incluyendo las aguas de reúso tratadas.

### 3.5.5 Calibración y validación.

La calibración del modelo está vinculada con los resultados del modelo acoplado WEAP-Modflow de simulación de toda la cuenca el río Elqui obtenida en el PEGH. Al ser los datos extraídos de dicho modelo, la calibración de los resultados, incluyendo los inputs hidrometeorológicos de precipitación, temperatura mínima y máxima condiciona los datos entregados en el Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón generado en este trabajo.

El proceso de calibración para la cuenca Elqui utiliza las estaciones de aforo, niveles de pozos y flujos subterráneos desde la perspectiva hidrogeológica. Además de lo anterior se consideran las infiltraciones de canales en la interacción superficial-subterránea.

Para el caso del nuevo modelo de gestión se utiliza la estación de aforo del estero el culebrón, llamada El Sifón, para ello se comparan los caudales aforados observados con los calculados en el modelo de gestión. Para ello se genera un estadígrafo de calibración considerando como principal parámetro el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) de acuerdo la Ecuación 4.

$$R^2 = \frac{\sum(N_{sim} - \bar{N}_{obs})^2}{\sum(N_{sim} - \bar{N}_{obs})^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- $R^2$ : Coeficiente de determinación
- $N_{sim}$ : Caudal simulado ( $m^3/s$ )
- $N_{obs}$ : Caudal observado ( $m^3/s$ )

### 3.6 CÁLCULO HIDROECONÓMICO DE LOS RESULTADOS DE LA GESTIÓN.

Para la estimación hidroeconómica, en primera instancia se realiza una caracterización de la calidad de agua requerida para el reúso con el objetivo de considerar los costes de tratamiento para el reúso de aguas residuales.

Seguidamente se seleccionan las alternativas de trazado considerando las características físicas del entorno.

#### 3.6.1 Costes directos de inversión y los costes de producción de agua reutilizada

Con el caudal de diseño se estiman los costes directos de inversión y los costes de producción de agua reutilizada a través de dos posibles trazados de conducciones realizadas desde las plantas de tratamiento; incluyendo sus tuberías de impulsión, plantas elevadoras y obras complementarias. Además de lo anterior, se calculan los costes de operación y mantenimiento considerando el tipo de planta de tratamiento, para hacer comparativas entre ellas que permitan generar datos para la estimación económica y el mejor ajuste de beneficio económico.

Dentro de las ecuaciones utilizadas para el cálculo se consideran las siguientes:

##### Caudal de diseño

se determina el caudal de diseño a partir de la información obtenida a través de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

##### Materialidad de tuberías

Las tuberías serán construidas de acuerdo con el cálculo de presiones en los tramos correspondientes, considerando dos tipos de materiales. En el caso de presiones menores a 100 m.c.a, se utilizará HDPE PE100 PN10. Para presiones mayores a 100 m.c.a, se requerirá acero con revestimiento de polietileno exterior.

##### Pérdidas de carga y diámetro de tuberías

Se estableció una velocidad máxima de 2,5 m/s para ajustar las presiones y diámetros de las conducciones. Para optimizar el diseño se priorizan velocidades no mayores a 1,8 m/s en la

conducción, escogiendo los diámetros adecuados que permitan evitar grandes pérdidas de energía y prevenir el riesgo de daños en las tuberías con el paso del tiempo, por lo que se escogerán diámetros convenientes en base a este criterio. La pérdida de carga friccional será calculada mediante la siguiente expresión de Hazen- Williams.

$$J = 10,67 * \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87} * C^{1,85}} * L \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- J: Pérdida de carga (m/m)
- Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- D. Diámetro interior (m)
- C: Coeficiente de rugosidad HW
- L: Largo tubería (m)

Para el desarrollo de este trabajo y cálculo de los sistemas, se considera un valor de coeficiente de rugosidad (C), igual a 150, de acuerdo con el catálogo de tuberías. Este valor depende de la materialidad de la tubería, que en este caso será acero un valor de C =150, para tuberías de acero de acuerdo con el catálogo técnico de tuberías.

Además de las pérdidas de carga, se suman estas, las pérdidas singulares: estableciéndose un porcentaje de un 5% de las friccionales. Se incluyen otras pérdidas, considerándose un 1% de las pérdidas friccionales, estas se relacionan con los equipos y piezas especiales en los trazados tales como válvulas, medidores de caudal, entre otras.

### Presión máxima de diseño

La presión máxima de diseño para los sistemas de conducción se calcula tomando en cuenta los datos obtenidos de las cotas de elevación de los perfiles de trazado propuestos, los caudales de diseño a impulsar y las pérdidas mencionadas en el acápite anterior.

### Plantas elevadoras de aguas y estanques de succión

Para realizar la impulsión de aguas residuales a través de plantas elevadoras se emplearán bombas centrifugas, dimensionándose de acuerdo al caudal y elevación estimadas para cada

sistema, la longitud de cada tramo y sus pérdidas. La potencia de las bombas se calcula mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$Potencia\ bomba\ [kW] = \frac{H * Q * g * \rho}{1000 * \left(\frac{n}{100}\right)} \quad Ecuación\ 6$$

Donde:

- H: Altura total de elevación(m)
- Q: Caudal elevación (l/s)
- g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- $\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)
- n: Rendimiento de bomba (80%)

Se estima un tiempo de bombeo de 20 minutos, con el que se calculan los estanques de succión. de acuerdo con los criterios para el dimensionamiento de Plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS en adelante) y Plantas elevadoras de agua potable (PEAP en adelante), establecidos en las normas NCh 2472 “Aguas Residuales - Plantas Elevadoras -Especificaciones Generales” y NCh 692 “Agua potable – Plantas Elevadora – Especificaciones Generales”.

#### [Estanques de almacenamiento de aguas](#)

Cada sistema considera una capacidad de almacenamiento de 10 horas de duración, en cada uno de los tramos considerados de los sistemas de conducción indicados.

#### [Planta de tratamiento de aguas residuales y requerimientos de calidad](#)

Para determinar las plantas de tratamiento se realiza una revisión de la calidad de aguas descrita en la Norma 1333. Norma Chilena NCh 1333/1987 - Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Se incluye una revisión de la NCh 3456/2021 Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego.

#### 3.6.2 Estimación de costes de los sistemas proyectados

Los costes para la estimar la inversión de construcción de los sistemas de conducciones y PTAS, fueron estimados en base a los antecedentes de informes tarifarios de empresas sanitarias de

la biblioteca de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), especialmente de la sanitaria Aguas del Valle. Además, se han utilizado los datos complementarios, basados en la empresa HYDRO Ingeniería y Construcción SpA (HYDRO IC), una empresa constructora dedicada al sector hidráulico. El detalle de estos valores se encuentra en el Anexo 6.

### Costes directos de inversión

A continuación, se presentan ítems considerados para el cálculo de los costes directos de los sistemas.

#### Conducción y Elevación

##### Movimientos de tierra: excavaciones y obras asociadas a las tuberías y estanques

- Excavaciones en zanja: m<sup>3</sup>
- Relleno cama de arena: m<sup>3</sup>
- Relleno lateral e inicial: m<sup>3</sup>
- Relleno material de excavación: m<sup>3</sup>
- Relleno material empréstito: m<sup>3</sup>
- Retiro de Excedentes: m<sup>3</sup>

##### Obras Civiles: específicamente a las obras asociadas para los estanques de succión.

- Hormigón H30-G25: m<sup>3</sup>
- Emplantillado: m<sup>3</sup>
- Barras de acero redondo A63-42H: kg
- Moldajes Cilíndricos: m<sup>2</sup>
- Moldajes Lisos: m<sup>2</sup>

##### Otros

- Suministro e instalación de tuberías: coste asociado al precio del material como también a la colocación e instalación en terreno.
- Terreno y expropiaciones: costes asociados al terreno y expropiaciones realizadas para la conducción del sistema y las plantas elevadoras.

- Equipos: equipos asociados a elevación de aguas. Se estima el coste de estos en base a la potencia calculada y a cotizaciones de los informes sanitarios ya mencionados.

#### PTAS

De acuerdo con las curvas de costes estimadas por (Godoy Bravo, 2021) se calculan los costes de los tratamientos utilizando como datos los caudales requeridos. Según cada alternativa de tratamiento se ha determinado una curva de estimación de costes en función del caudal o área requerida. A continuación, se presentan las curvas utilizadas de acuerdo con las alternativas de tratamiento.

Lodos Activados (LA): Se determina un ajuste potencial de tendencia en función del caudal de diseño, utilizando la ecuación la Ecuación 7.

$$C \text{ [€]} = 2 * 10^7 * Q^{0.9246} \quad Q \text{ en (l/s)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Biorreactor de Membrana (MBR): Para estima los costes en la implementación usando biorreactores de membrana se ha utilizado la Ecuación 8, de acuerdo con lo indicado por (Codagua, 2018) y (Costwater, 2020).

$$C \text{ [€]} = 2 * 10^9 * Q^{0.3763} \quad Q \text{ en (l/s)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Humedales Artificiales (HA): esta alternativa emplea una ecuación en función del caudal de diseño y se estimada en base a casos reales (Kadlec, 2009). El área se estimó en base a (Unites States Enviromental Protection Agency Protección, 2007), siendo esta de 1750% el área de un sistema de LA.

$$C \text{ [miles de €]} = 194 * A^{0.69} * 1,4 \quad \text{Área en (ha)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Área requerida PTAS: Se utilizan como referencia para esta estimación, las áreas empleadas en los tratamientos de lodos activados. Se estiman en un 30% del área requerida de lodos para los sistemas MBR y en 1750% para humedales construidos (Godoy Bravo, 2021).

#### Obras complementarias

Se incluyen también costes de: obras complementarias como obras civiles asociadas a los estanques de almacenamiento, además de terreno y expropiaciones para la instalación de estanques de almacenamiento.

### Costes de operación y mantenimiento

En este ítem se consideran los costes de operación y mantenimiento, entre ellos; transporte, monitoreo, ensayos de laboratorio, personal operativo, energía, disposición final de lodos. Estos costes se dividen en costes fijos y variables.

#### Lodos Activados.

Para estimar los costes de operación y mantenimiento de la PTAS mediante LA se ha implementado una curva de manera similar la estimación de los costes de inversión, que se presenta en Figura 3-5. Esta curva se construyó en base a la información de las empresas sanitarias ESVAL y ESSBIO en sus estudios tarifarios (SISS, Estudios Tarifarios 2016-2021, 2021).

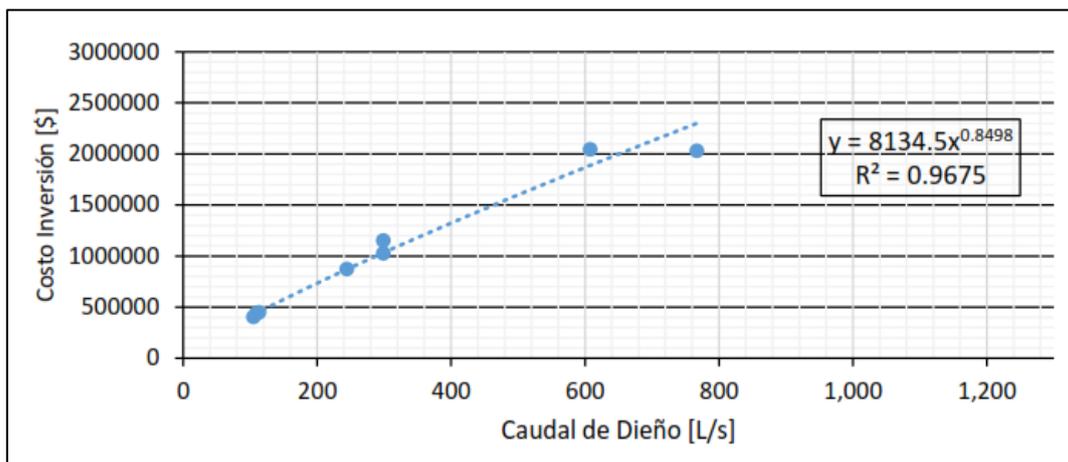


Figura 3-5. Curva de ajuste para la determinación de costes de O&M en PTAS de Lodos Activados.

Fuente: Figura 26. (Godoy Bravo, 2021).

#### Biorreactor de Membrana (MBR)

Los costes de operación y mantenimiento de la PTAS con MBR se estiman en base al caudal de diseño con un ajuste polinómico según distintos casos aplicados y elaborado por (AMPHOS, 2014). A continuación, en la Figura 3-6 se presenta lo indicado.

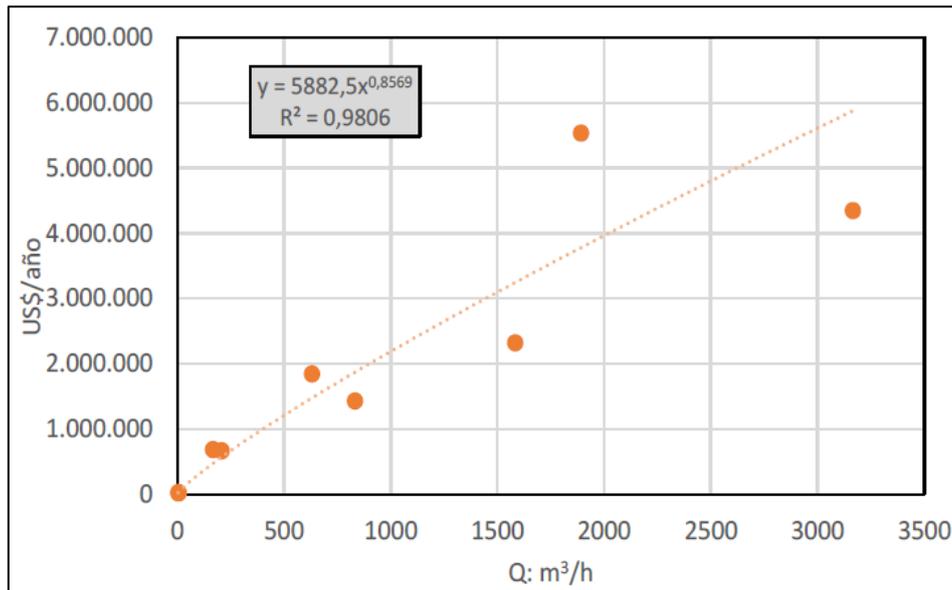


Figura 3-6. Curva de ajuste para la determinación de costes de O&M en PTAS sistema MBR.

Fuente: Figura 25. (Godoy Bravo, 2021).

### Humedales Construidos

Para el cálculo se ha tomado información teórica sobre los costes de mantenimiento y operación, bajo la fuente (Kadlec, 2009). En la ecuación siguiente, se presente lo anterior:

$$C \text{ [€]} = 2000 * A \quad A = \text{área humedal en (ha)} \quad \text{Ecuación 10}$$

### Transporte

Por último, los costes de operación y mantenimiento de transporte, asociados a la conducción de aguas servidas, elevación y obras complementarias, se determinan mediante la potencia instalada de acuerdo con lo indicado por (Godoy Bravo, 2021), según las siguientes ecuaciones.

$$C \text{ [€/mes]} = CF + (CST + CSP + CE) + CM + CP \quad \text{Ecuación 11}$$

$$C \text{ [€/año]} = C + 12 + 1.1/758 \quad \text{Ecuación 12}$$

- CF: Cargo fijo mensual (€/mes)
- CST: Cago por uso del sistema de transmisión (€/kWh)
- CSP: Cargo por Servicio Público (€/kWh)
- CE: Cargo por energía (€/kWh)
- CPC: Cargo por potencia contratada (€/kW/mes)

### 3.6.3 Estimación agroeconómica

En esta estimación se calculan los beneficios que se pierden cuando no se satisface la demanda de riego en los cultivos o también denominada costes de escasez.

Los datos utilizados para estimar el beneficio neto por hectárea y clasificar los datos, son los siguientes:

- Ingreso por hectárea.
- Costes directos por hectárea.
- Costes totales por hectárea.
- Margen bruto por hectárea.
- Margen neto por hectárea.
- Coste unitario.

Los costes de escasez se estiman en base a las hectáreas regadas por cada tipo de cultivo (cereales, hortalizas etc.), tecnificado y no tecnificado de las Zonas de Riego. Con los datos de las "Fichas Técnico Económica" de cultivos, generadas por la "Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura" se obtienen el margen neto por hectárea a partir del déficit de demanda porcentual. Con ello se puede calcular el margen en costo de escasez, al no satisfacer la demanda de los regantes. Luego, dependiendo de si se logra satisfacer porcentualmente la demanda con la nueva oferta hídrica (reutilización), se puede estimar el margen de beneficio que entregaría a los regantes incluir la reutilización en su zona de riego. En la Figura 3-7 se presente un esquema de lo anteriormente indicado.

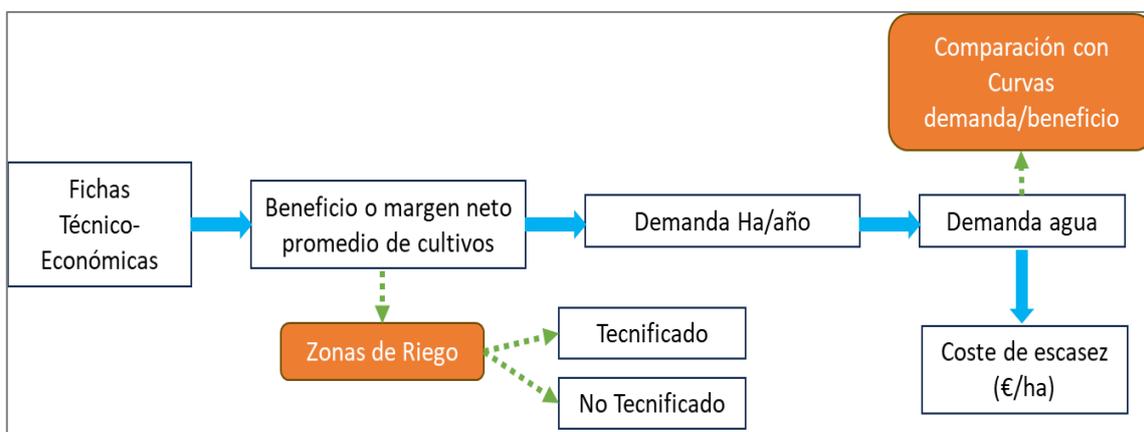


Figura 3-7. Esquema conceptual de estimación de costes de escasez de demanda agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

Las funciones entre agua aplicada y beneficio neto se estiman linealmente y se comparan con las curvas de demanda de agua y beneficio neto calculadas por (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023). Estas curvas se determinan en base los sectores de la cuenca estudiados.

$$E [\pi_{s,w}] = a \cdot \ln(x) + b(x) + c \quad \text{Ecuación 13}$$

$$D (s, w) = \frac{d}{dx} E [\pi_{s,w}] \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- $E [\pi_{s,w}]$ : Beneficio neto de acuerdo con cada sector de cultivo (CPL)
- a,b y c: parámetros de la ecuación según sector de cultivo
- x. demanda de agua (l/s)

#### 3.6.4 Cálculo de evaluación hidroeconómica

Para realizar la evaluación hidroeconómica se utilizan las herramientas financieras de Valor Actual Neto (VAN en adelante) y Tasa Interna de Retorno (TIR en adelante), para la evaluación y selección de proyectos de inversión.

El Valor Actual Neto evalúa los flujos netos, como la diferencia entre ingresos y egresos por año, actualizados utilizando una tasa de descuento como rentabilidad mínima para recuperar inversión y obtener beneficios. El principal criterio de aceptación de los proyectos de inversión es evaluando si el VAN es igual o mayor a 0. En este caso los proyectos se evaluación excluyentemente y debe optarse por el que obtenga el mayor VAN (Mate, 2014). A continuación expone la ecuación simplificada del VAR utilizada.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} - I_o \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- VAN: Valor Actual Neto
- $F_n$ : flujo de efectivo neto del período
- i: tasa de expectativa o descuento
- n: número de períodos de vida útil del proyecto
- $I_o$ : inversión inicial

Otro componente para la toma de decisión sobre los proyectos de reutilización de aguas residuales es la Tasa Interna de Retorno (TIR), definida por (Mate, 2014) como la tasa de descuento que iguala la sumatoria del flujo efectivo neto de periodo de vida útil. Como criterio de aceptación se considera que debe optarse por aquel proyecto de reutilización que un TIR mayor. A continuación se presenta la ecuación simplificada del TIR:

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1 + I_o)^n} = 0$$

*Ecuación 16*

Donde:

- TIR: Tasa Interna de Retorno
- $F_n$ : flujo de efectivo neto del período
- $n$ : número de períodos de vida útil del proyecto
- $I_o$ : inversión inicial

Los antecedentes de flujos netos considerados para la evaluación hidroeconómica fueron los siguientes:

- Inversión planta de reutilización y conducción
- Costos operación, mantenimiento y energía
- Pérdidas por demanda insatisfecha
- Beneficios por demanda satisfecha
- Beneficio recarga de acuíferos

Para desarrollar las evaluaciones hidroeconómicas, se ha considerado el año de inicio en 2022 con horizonte de retorno al año 2050. Se considera que los tres primeros años son para la construcción de las obras, en el que se considera el primer año una inversión del 40%, en el segundo y tercer año, una inversión del 30% en cada uno. El inicio de la operación del sistema en el año 2025. Por tanto, la recarga de acuíferos se considera su inicio en el año 2026.

## 4 CASO DE ESTUDIO: REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN SISTEMA ELQUI.

### 4.1 ANÁLISIS ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL VALLE DEL RÍO ELQUI

La cuenca del río Elqui, cuenca de estudio, se encuentra administrativamente inmersa dentro de la región de Coquimbo, a su vez en la Provincia del Elqui con sus respectivas comunas. En el presente subcapítulo se presentan las características principales de la cuenca, entorno a sus dimensiones físicas, las variables climáticas, la conceptualización resumida de los resultados del modelo realizado en el Plan Estratégico de Gestión Hídrica del sistema Elqui como datos de entrada para el desarrollo del Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón.

#### 4.1.1 Dimensión física de la cuenca

##### Geomorfología

Geomorfológicamente existe en la cuenca un conjunto de elementos claramente identificables, siendo los grupos principales: la cordillera de los Andes, los valles, la cordillera de la costa y las planicies litorales (DGA-CI, 2004). La sección topográfica de la cuenca del río Elqui se muestra en la Figura 4-1 y en la Figura 4-3 se muestra el diagrama unifilar de los cauces principales de la cuenca del Elqui.

#### 4.1.2 Caracterización climática

La cuenca del río Elqui posee varios climas, los cuales podemos observar en la Figura 4-2 según el criterio de Köppen-Geisger.

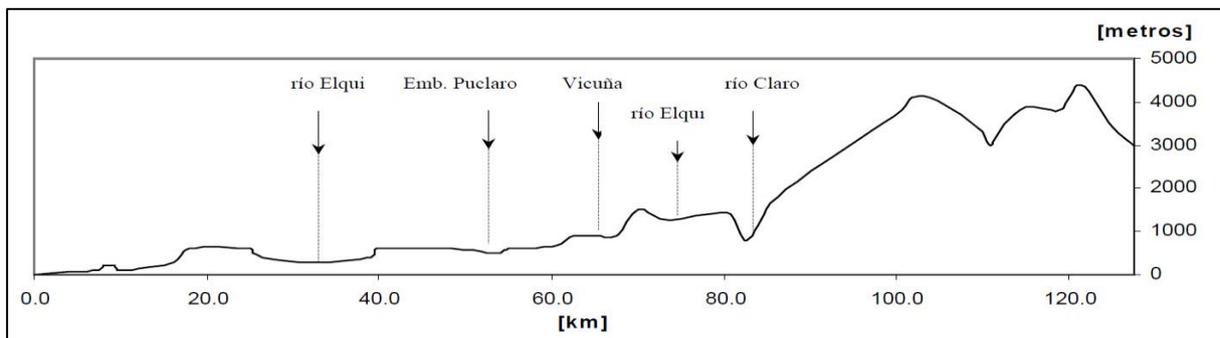


Figura 4-1. Perfil topográfico W-R a la latitud de 30° en la cuenca del río Elqui.

Fuente: Figura 2.1-1 de PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

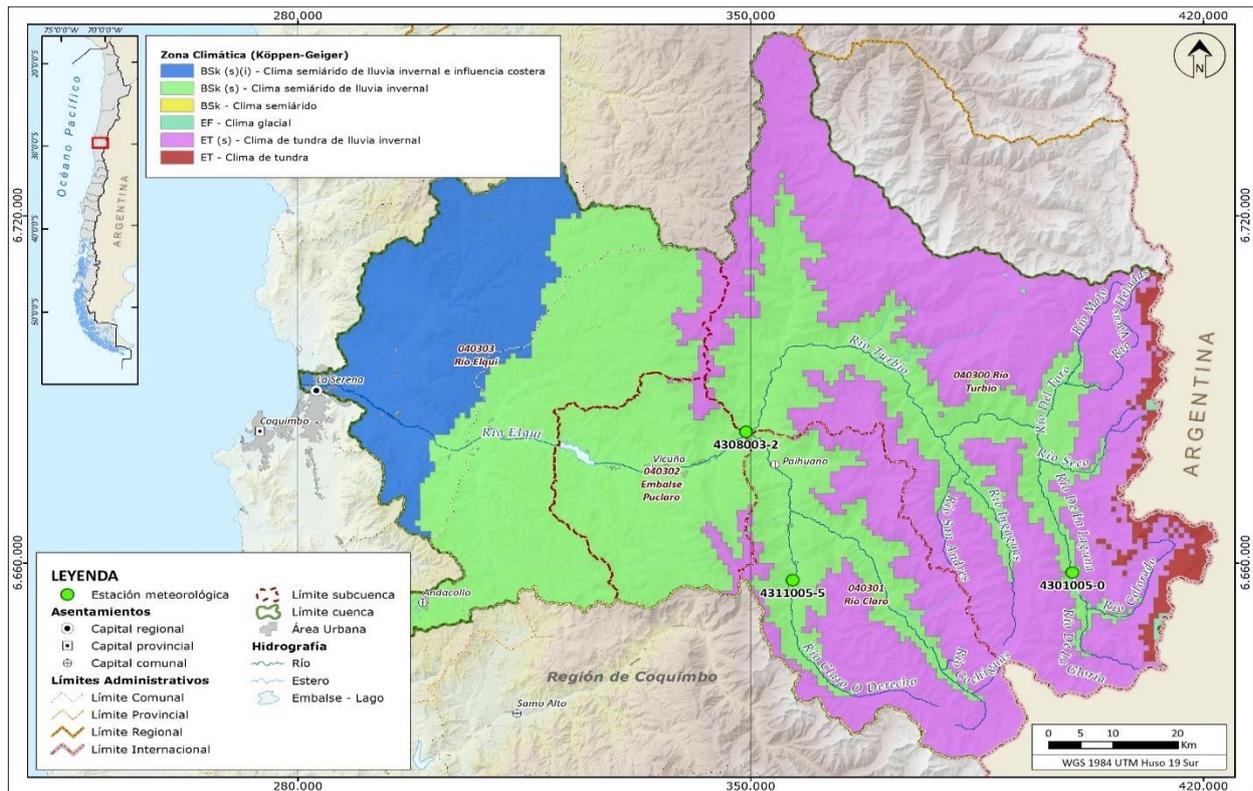


Figura 4-2. Clasificación de Zonas Climáticas Köppen-Geisger.

Fuente: Figura 2.2-1 de PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

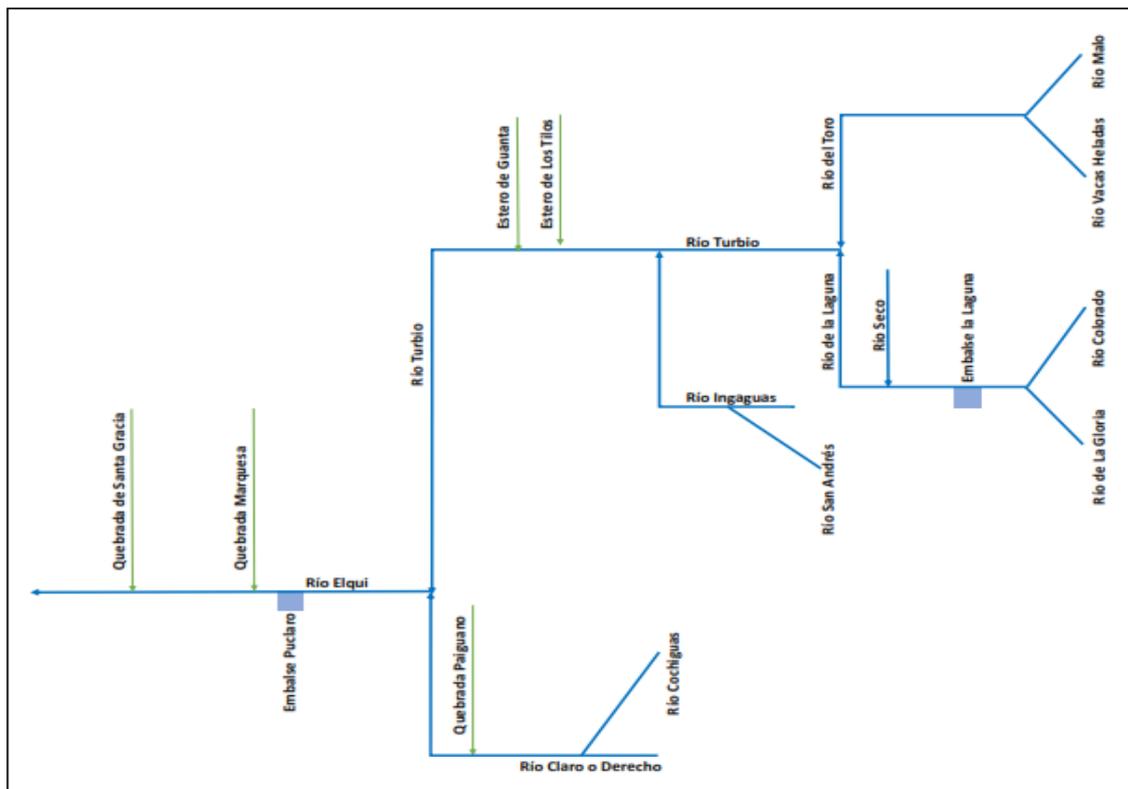


Figura 4-3. Diagrama unifilar de los cauces principales de la cuenca del Elqui.

Fuente: Figura 2.1-4 de PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

#### 4.1.3 Balance hídrico de la cuenca

Con los resultados del modelo WEAP del PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) se analiza a continuación el balance hídrico de la cuenca en sus componentes superficiales y subterráneas.

##### Oferta superficial:

La Tabla 4-1. presenta el abastecimiento de agua de sus ríos y afluyente, teniendo en cuenta la probabilidad de excedencia del 50% ( $Q_{50}$ ) y 85% ( $Q_{85}$ ) en estaciones pluviométricas para el período 1990-2019, sin requerimientos de agua, ni obras.

Tabla 4-1. Oferta en la fuente, periodo 1990-2019.

Estación	$Q_{50}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{85}$ (m <sup>3</sup> /s)
Río Toro antes junta río la laguna	0,498	0,377
Estero Derecho en Alcohuaz	0,548	0,291
Estero Culebrón en el Sifón	1,078	0,117
Río Cochiguaz en el Peñón	1,138	0,808
Río la laguna en salida embalse La laguna	1,370	0,225
Río Claro en Rivadavia	1,569	0,977
Río Elqui en La Serena	3,548	1,462
Río Turbio en Varillar	4,547	2,555
Río Elqui en Almendral	6,514	3,762
Río Elqui en Algarrobal	6,929	4,026
Río Elqui salida embalse	6,982	4,238

Fuente: Elaboración propia en base a PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

##### Oferta subterránea:

Dado que ninguno de los SHAC analizados cumplió con los criterios de sostenibilidad del acuífero, no existe suministro subterráneo sostenible capaz de satisfacer una demanda mayor que la oferta actual.

En la Figura 4-4 se presentan las gráficas extraídas de los resultados del modelo WEAP PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) se distingue claramente que en los dos escenarios de cambio climáticos, CSIRO y CCSM4, el acuífero del Estero Culebrón (AC\_CUL\_01), es el que tiene mayor tendencia a disminuir su volumen y no ser sostenible en el tiempo. Se calcula que desde el año 2022 el acuífero no tendrá agua, dato que hoy en día no es corroborable debido a la falta de datos y mediciones. Si es sabido de sus condiciones de

sequía actuales actual. Es por estas condiciones que es que se considera un sector importante de incluir una nueva aportación.

*Demanda registrada y proyectada:*

La Tabla 4-2. proporciona un resumen de los valores de la demanda actual y proyecciones a los 10 y 30 años diferenciados por finalidad de uso.

*Tabla 4-2. Resumen de demandas de la cuenca del río Elqui.*

Sector	Año 2019		Año 2030		Año 2050		Var. 2019/2030	Var. 2019/2050
	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /s)	(%)	(%)
Agua potable urbana	31.919.232	1,01	35.908.543	1,14	41.482.682	1,32	12%	30%
Agua potable rural	2.263.043	0,07	2.870.392	0,09	4.672.405	0,15	27%	106%
Agrícola (*)	223.404.010	7,08	226.902.864	7,20	220.240.713	6,98	2%	-1%
Pecuario	134.709	0,00	206.912	0,01	293.258	0,01	54%	118%
Minería	11.451.724	0,36	12.056.730	0,38	10.461.377	0,33	5%	-9%
Industrial	64.378	0,00	61.119	0,00	62.642	0,00	-5%	-3%
Generación eléctrica (**)	128.501,422	4,07	91.984.619	2,92	123.016.061	3,90	-28%	-4%
Turístico (***)	-	9,22	-	9,22	-	9,22	0%	0%
Protección ambiental	-	7,24	-	7,24	-	7,24	0%	0%

(\*) Demanda bruta (sin considerar eficiencia de riego).

(\*\*) Demanda no consuntiva, asociada a centrales hidroeléctricas de pasada.

(\*\*\*) Demanda anual asociada a una distribución mensual, en unidades m<sup>3</sup>/s.

Fuente: Elaboración propia en base a PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

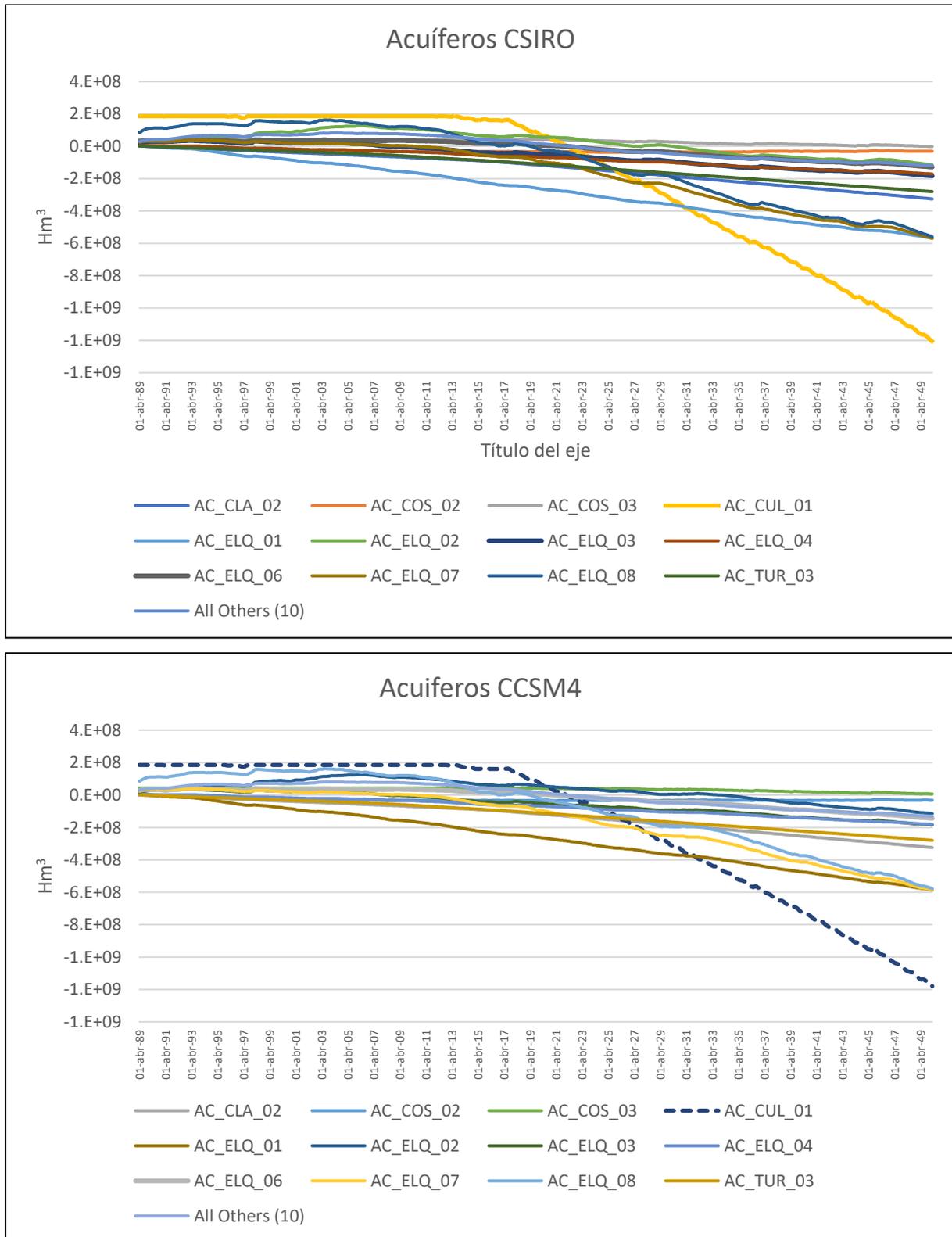


Figura 4-4. Descenso de volumen en acuíferos de Sistema Elqui MGC CSIRO y CCSM4.

Fuente: Figura 2.1-4 de PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Cabe señalar que el principal consumo está relacionado con el riego (83,0%), mientras que la minería representa el 4,3% del total. El agua doméstica en áreas urbanas y rurales representa alrededor del 12,7%. En comparación con la demanda futura relacionada con la actividad agrícola en la cuenca, se espera un ligero cambio en el tiempo, ya que si comparamos el período 2019-2030, se espera que aumente en un 2%, mientras que si comparamos con el 2019-2050 se observa una disminución del 1% (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

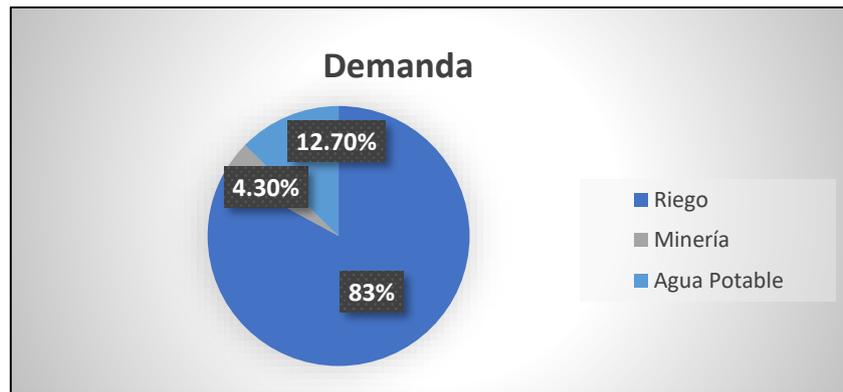


Figura 4-5. Distribución porcentual de usos demandados.

Fuente: Elaboración propia en base a PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Relación oferta y demanda:

La Figura 4-6. se muestra el caudal en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) histórico desde el año 1989 al 2050, en la boca de la desembocadura hacia el mar del río Elqui, donde se puede observar que el caudal varía de 0 a  $55 m^3/s$ , con una media aproximada de  $10 m^3/s$ .

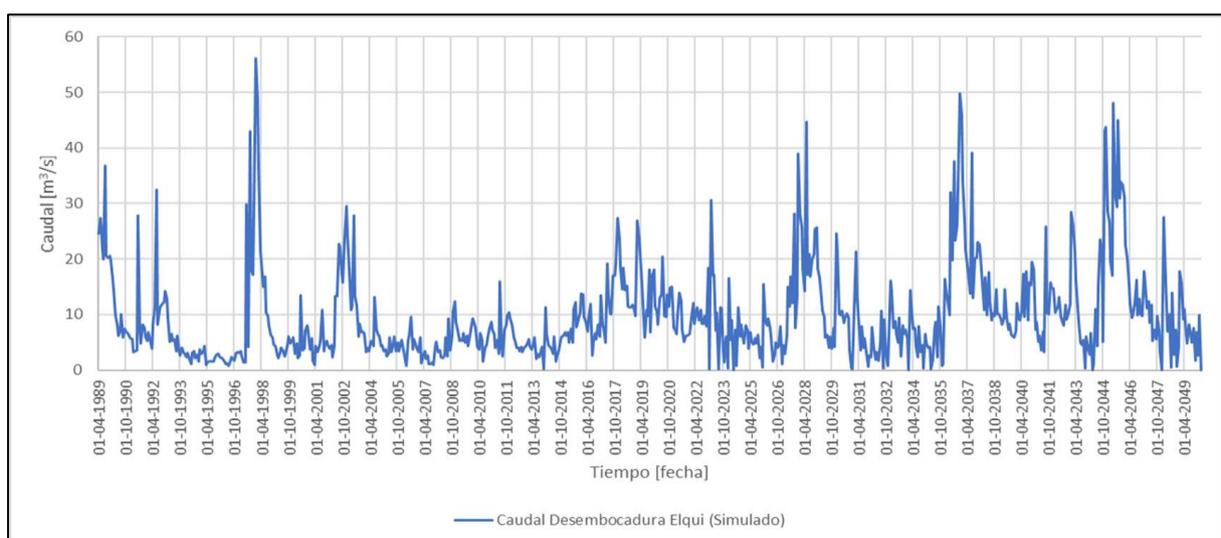


Figura 4-6. Registro de Caudal de desembocadura simulado.

Fuente: Elaboración propia en base a PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

#### 4.1.4 Aguas residuales en la cuenca del Elqui.

A lo largo de Chile, las aguas servidas urbanas generan un caudal aproximado de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  que son vertidos en diversos cuerpos de agua, como ríos, lagos, y océano. A este último vierten un caudal de  $8,80 \text{ m}^3/\text{s}$  (CORFO/Diagua Consultores, 2019). Al ser un caudal que puede incorporarse como nueva fuente de disponibilidad neta, suscita un interés importante en los sectores de mayor déficit hídrico. A pesar de que existe un retorno a cauces que son aprovechados, no se realiza de una forma eficiente para utilizar todo el recurso. Por lo anterior se hace necesario realizar estrategias que ayuden a optimizar este reuso.

Según (Prats Rico, 2000) en la mayoría de las zonas costeras las aguas residuales son enviadas al mar utilizando emisarios submarinos para su vertido, en algunos casos acuíferos o cauces que no pueden ser aprovechados en el sistema. Esto ocurre de forma diferente en las aguas residuales en zonas interiores, ya que puede ser diluías a ríos o embalses, dando continuidad al recurso.

De acuerdo con el PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) las medidas relativas a nuevas fuentes de agua comprenden iniciativas que repercuten positivamente sobre la oferta hídrica en la cuenca, tal como la recarga artificial de acuíferos, la desalinización o el uso de aguas servidas tratadas. Sin embargo, solo fueron modeladas y analizadas en detalle en el Modelo acoplado WEAP-Modflow, las dos primeras. La reutilización de aguas tratadas se considera únicamente como una un estudio de factibilidad.

De acuerdo con el análisis realizado por (CORFO/Diagua Consultores, 2019) es importante revisar las restricciones del marco institucional y económico para el aprovechamiento de la reutilización de las aguas residuales, que haga de esta una alternativa factible de realizar, considerando la economía circular como propósito principal. Dentro de lo anterior, se distinguen temas como la seguridad jurídica de propiedad de las aguas tratadas, normas ambientales y la consideración de externalidades positivas para lograr financiamiento público a las iniciativas. Estas consideraciones serán tomadas en cuenta para el desarrollo del presente trabajo.

### Participación Ciudadana en la propuesta de reutilización de aguas servidas

En las observaciones de la participación activa ciudadana (PAC en adelante) expuestas en el PEGH, presentada en el Anexo F del PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) se pone valor a la consulta a los ciudadanos y otros actores sociales, económicos y/o políticos involucrados en el territorio.

Los objetivos específicos identificados en el proceso PAC del PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) fueron, en resumen, los siguientes:

- Realizar una sistematización y análisis de los acuerdos obtenidos en planes de gestión hídrica anteriores, en los que se hayan alcanzado acuerdo y se determinaron conclusiones.
- Realizar una consulta institucional a los actores del agua en la cuenca para promover coordinaciones de decisión pública y privada, asociado a planes, programas y proyectos, vinculados o parcialmente vinculado con decisiones de gestión hídrica.
- Recopilar información necesaria para complementar el diagnóstico.
- Presentar a las organizaciones de usuarios del agua (OUA en adelante) de las cuencas y organizaciones privadas de usuarios del agua la simulación de los escenarios hídricos de gestión para su revisión.
- Consolidar el resultado del proceso PAC para ser presentado a los ciudadanos en general.

El plan presentado abarca generalmente a los usuarios del agua y no necesariamente a toda la población. Dentro de estas reuniones se observan variadas opiniones, donde cada usuario propone las demandas que el aquejan. Para el caso de estudio se dará énfasis en dos usuarios importantes, los regantes o agricultores, y los usuarios de alcantarillado público, quienes verán afectada su infraestructura.

### Actores relevantes de Participación Ciudadana

Los actores sociales que se consideran importantes según el PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020), son las agrupaciones o personas naturales que están relacionadas con el

agua. Por ejemplo, sobre derechos de agua, acceso a los recursos o poseen formación técnica en materia de recursos hídricos en la cuenca.

De acuerdo con las reuniones realizadas en las sesiones de participación se han obtenido comentarios relevantes sobre el reúso de aguas residuales o tratadas y que dan a conocer la importancia de activar el reúso de agua, las cuales se presenta a continuación:

La Minuta de Reunión Nº 2 del Anexo I del Plan Estratégico (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) Tema Nº2: Identificación de iniciativas en cuencas de Choapa, Elqui y Limarí. En su punto 10 Eric Chulak Yañez - El Jefe de Oficina de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS en adelante) señala:

*“En relación con la reutilización del agua, se está trabajando en la normativa, el problema es que los regantes creen que las aguas tratadas son parte de las aguas de riego, debe haber mayor claridad acerca de quién es el propietario de ellas. Eric Señala que se requiere una Ley general que incorpore la reutilización del agua, las aguas desalinizadas, así mismo es necesario que exista una política integral del recurso hídrico. Indica que es necesario diversificar las fuentes de recursos hídricos, que en la actualidad solamente contempla aguas superficiales y subterráneas”.*

Carlos Galleguillos – Director Regional DGA de Coquimbo indica:

*“Las aguas tratadas no son administradas en la actualidad, indica que la organización de los recursos hídricos se ha realizado de acuerdo al uso y costumbre”.*

La Minuta Nº3 del Anexo I del Plan Estratégico (Dirección General de Aguas (DGA), 2020): Tema Nº2: Identificación de iniciativas en cuencas de Choapa, Elqui y Limarí. En su punto 16 Pablo Álvarez – director Laboratorio PROMMRA Indica:

*“Se menciona el tema de la reutilización de agua (apareció en APR), no obstante, en Elqui cantidad de agua residual que se entrega por los emisarios al mar es una cantidad enorme de litros. La Serena y Coquimbo son localidades costeras y donde la cantidad de agua residual urbana es muy importante. Entonces, no hay caudal ecológico que resista, (tirando 900 L/s o 600 L/s al mar) por las razones que sea. En este sentido menciona que esa*

*reutilización urbana le parece importante, y en el caso particular del Elqui es muy importante".*

Carlos Galleguillos – director regional DGA de Coquimbo menciona que:

*“En cuanto a la reutilización de aguas grises, es un problema de carácter legal poder hacer uso de esas aguas, debido a que esos emisarios no son fuentes de abastecimiento, o sea, no están dentro del área que la DGA pueda establecer como un derecho de aprovechamiento de agua, estos son excedente que hay de un sistema de repartos de agua a través de la administración que hace una sanitaria”.*

La Minuta N°6 del Anexo I del Plan Estratégico (Dirección General de Aguas (DGA), 2020). Tema N°2: Identificación de iniciativas en cuencas de Choapa, Elqui y Limarí. En su punto 23 Alejandro Romero S. Subgerente Zonal Elqui – Aguas del Valle (Empresa Sanitaria) indica que:

*“Respecto de las aguas residuales y su reutilización menciona que mantienen acuerdo con industrias para poder hacer SWAP de agua, indica que están desarrollando trabajos en esta línea”.*

De lo anteriormente expuesto sobre las minutas de participación ciudadana, se destaca la preocupación por no incluir el reúso de las aguas residuales dentro de la oferta de abastecimiento hídrico en el Sistema Elqui, haciendo referencia a falta de normativa y legislación del tema para su instauración. Además, existen aspectos jurídicos que involucran a los Servicios Sanitarios sobre la administración de este recurso. En la actualidad se está trabajando en dichos aspectos para lograr dicha implementación legal y administrativa.

#### [PTAS del Sistema Elqui](#)

El PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) identifica en la tabla 7.2-1 “Resumen de Evaluación económica del PEGH”, que es posible reutilizar el agua del ES del sistema La Serena - Coquimbo, pero es necesario realizar una factibilidad. Además, plantea la “acción” (acciones propuestas en el estudio) de realizar un estudio de dicha factibilidad. El estudio se denominaría: “Diagnostico de factibilidad para la implementación de sistemas de reúso de aguas residuales generados en la PTAS del sistema La Serena- Coquimbo”. Se estima un Valor

Actual Neto (VAC en adelante) de 227 mil euros y un Coste Actual Neto de (CAE en adelante) de 114 mil euros (€) para realizar dicho estudio.

En la Tabla 4-3. se presenta el registro de las PTAS existentes de la cuenca del Elqui incorporando su medio receptor.

*Tabla 4-3. Registro de PTAS en la cuenca del río Elqui.*

Cuenca	Sub sistema	Empresa Sanitaria	Receptor
Río Elqui	Andacollo	Aguas del Valle S.A.	Estero sin dilución
	La Serena - Coquimbo		Mar
	Paihuano		Riego
	Peralillo de Vicuña		Río con dilución
	Vicuña		

Fuente: Tabla 2.4-6 de PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Luego de revisar las características de la cuenca, su balance, y los antecedentes referidos a la reutilización de aguas residuales, en el siguiente subcapítulo se presentara el resultado de los cálculos de las aportaciones que serian utilizadas para ser incluidos en el sistema Elqui como medida de adaptación al cambio climático.

#### Análisis ambiental preliminar de ubicación planta de reutilización

La empresa AQUA ADVISE en 2014 realizó este estudio comparativo entre la instalación de plantas desaladoras y la reutilización de aguas servidas en la conurbación La Serena-Coquimbo (Agua Advise, 2014). En este estudio se analizó la ubicación idónea para la instalación de una planta de reutilización futura.

#### Localización

Los tres posibles emplazamientos evaluados para la ubicación de las instalaciones de la planta desaladora o de la planta de reutilización, se identifican en la Figura 4-7.

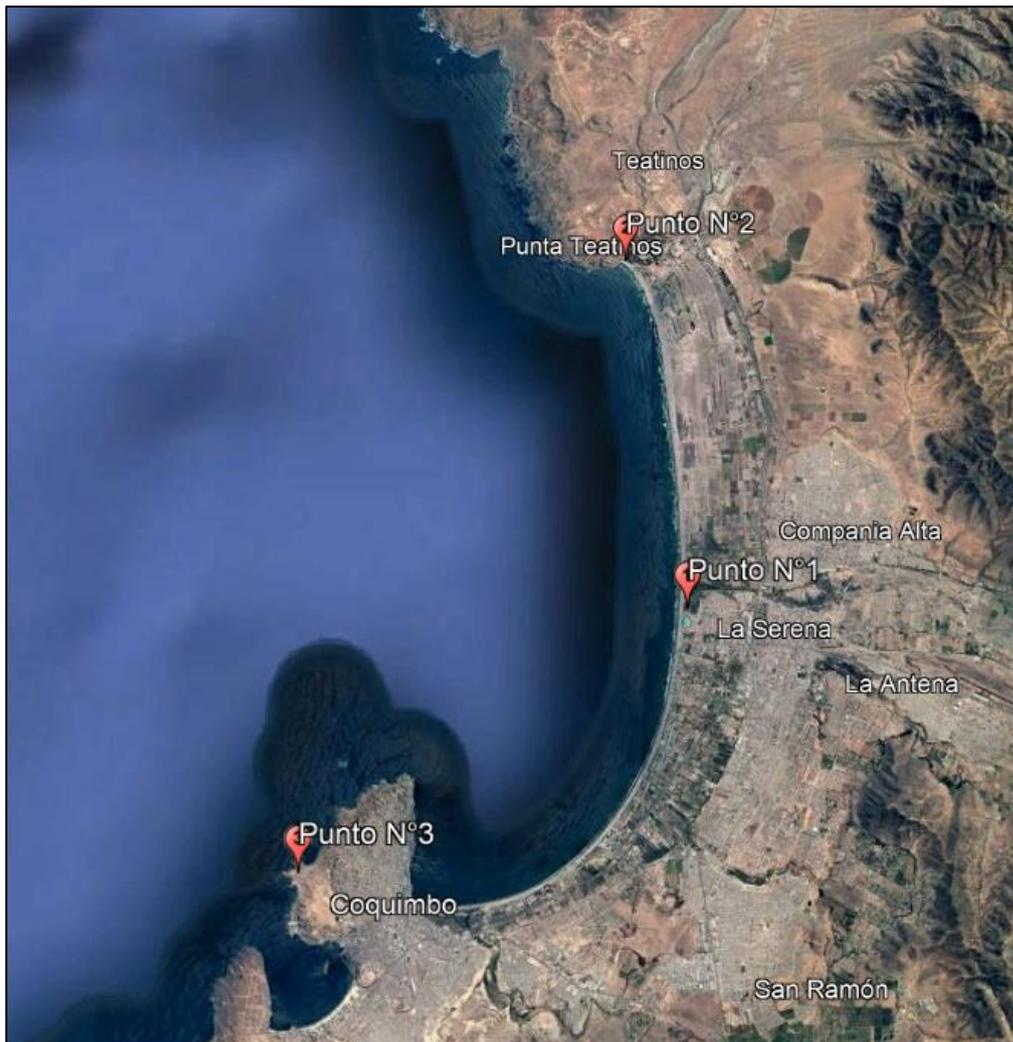


Figura 4-7. Puntos de posibles emplazamientos de plantas desaladoras y reutilización.

Fuente: Elaboración propia con base en (Agua Advise, 2014).

La elección de localización se ha realizado considerando el resumen en las variables técnicas, económicas, medioambientales y sociales que caracterizan cada punto de estudio, específicamente a temas de reutilización.

1. Localización geométrica: el Punto N°1 es el que tiene una localización geométrica más equidistante con la conurbación La Serena-Coquimbo respecto a los otros dos.
2. Disponibilidad legal de terrenos: En el Punto N°1, la empresa sanitaria Aguas del Valle y la Minera San Gerónimo disponen de superficies cercanas para la ubicación de las instalaciones de PTAS.
3. Cercanía de zonas agrícolas: los tres puntos de estudio se ubican cerca de zonas agrícolas de La Serena o de Coquimbo.

4. Infraestructuras ya existentes: Los puntos N°1 y N°3 permiten el uso del emisario de la planta de tratamiento primario de La Serena o el de Coquimbo.
5. Consumo energético impulsión producto: Los Puntos N°1 y N°2 del estudio se ubican cerca de la población de la Serena y de zonas agrícolas; el Punto N°3 de estudio se ubica cerca de la población de Coquimbo y de zonas agrícolas, zona de desarrollo de un parque industrial y de la Minera Teck.
6. Impacto de las obras: el inconveniente del Punto N°1 es su cercanía a la población de la Serena y a la zona turística. Los otros dos puntos de estudio se consideran suficientemente alejados de la población de la Serena, de la población de Coquimbo y de zonas turísticas.
7. Influencia sobre tramitación del EIA: en el área de los puntos N°1 y N°3 ya se han construido las plantas de tratamiento primario de La Serena y de Coquimbo, así como sus respectivos emisarios.

#### Análisis ambiental preliminar

Se consideran para la evaluación variables ambientales, y variables técnicas-económicas como su cercanía con zonas costeras y con las redes sanitarias. El análisis ambiental se desarrolló en base a Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Se realizó la caracterización ambiental preliminar del área de estudio en base a las siguientes variables:

*Tabla 4-4. Caracterización ambiental en base a variables.*

Variable Analizada	Resultado
Cascos Urbanos	Existen dos, que corresponden a conurbación de las ciudades de La Serena y Coquimbo.
Sistema Lacustre	No existen lago o cuerpos de agua similares, en las zonas estudiadas.
Rutas de Acceso	La Ruta 5 es la principal que conecta la conurbación La Serena-Coquimbo, además de recorrer todo Chile. Otra ruta importante para acceder a la conurbación, viene de Ovalle y es la de acceso es la Ruta 43

Variable Analizada	Resultado
Sub-estación Eléctrica	El Peñón, CGS y Pan de Azúcar se detectan como las más cercanas a la costa a una distancia aproximada de 3,5 km.
Líneas de Tensión Eléctrica	En el área de estudio existen cuatro líneas de alta tensión, denominadas: Pan de Azúcar-San Martín, Pan de Azúcar-Ovalle, Guayacán –Pan de Azúcar, Pan de Azúcar-Marqueza.
Generación de Energía	No existen obras asociadas a generación de energía.
Superficies con algún nivel de protección	Se detectó la presencia de tres Sitios Prioritarios para la Conservación de la Naturaleza, dos de ellos corresponden a la Red de Humedales Costeros de la comuna de Coquimbo. A su vez, el tercer Sitio corresponde a Punta Teatinos-Caleta Hornos, el cual se encuentra catalogado como Sitio de Prioridad I. Por otra parte, se detectó la presencia de un Área de preservación ecológica denominada Humedal de Tongoy.
Monumentos Históricos	Se detectaron alrededor de 19 elementos históricos los que se encuentran localizados en su mayoría en el casco urbano de las ciudades de La Serena y Coquimbo.
Área turística Prioritaria	En el área de estudio no se detectó la presencia de áreas turísticas prioritarias.

Fuente: Elaboración propia en base a (Agua Advise, 2014).

En la Tabla 4-5. se presenta un resumen de las conclusiones preliminares de emplazamiento de las opciones, se consideran colores para identificar la evaluación “tipo semáforo” del análisis realizado.

Tabla 4-5. Resultados conclusiones preliminares de ubicación.

	Ubicación	Accesibilidad	Acceso a energía	Carga ambiental					
				Planificación territorial		Áreas protegidas	Concesiones	Riesgo	Turismo
				PRDU	PRC				
<b>Punto 1</b>	Buena	Buena	Buena	Media	Baja	Baja	Baja	Media	Baja
<b>Punto 2</b>	Buena	Buena	Buena	Media	Alta	Alta	Media	Baja	Alta
<b>Punto 3</b>	Buena	Media	Buena	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Fuente: Elaboración propia.

La conclusión principal es que el Punto N°2 debe ser descartado por afectar ambientalmente en mayor medida que los otros puntos para la instalación de plantas de reutilización o desaladora. Se concluye además que, la planta de reutilización debe ser instalada de un sector adyacente a la planta de tratamiento primario ya existente. (Agua Advise, 2014).

Los puntos N°1 y N°3 son evaluados en similares características ambientales, por lo que deberán examinarse en mayor detalle. Ambos puntos están emplazados en zonas turísticas, por lo que será necesario ajustarse a las normativas ambientales e integrar la construcción de las plantas con estas zonas.

## 4.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PTAS PARA REUTILIZACIÓN

### 4.2.1 Selección de PTAS para reutilización

Es importante considerar que la mayoría de las PTAS vuelven al sistema (reúso indirecto) exceptuando las PTAS de La Serena y Coquimbo que van como efluente al Océano Pacífico. En la Tabla 4-6 se presenta un resumen de las PTAS de la cuenca del Elqui, exponiendo su tipo de tratamiento, el medio receptor, tipo de oferta probable y caudales a entregar como efluente.

*Tabla 4-6. Análisis de PTAS en la cuenca del río Elqui.*

Nombre	Tipo de Tratamiento	Receptor	Tipo de Oferta Probable	Caudal Max Día	Caudal Med Men	Caudal Max Pun
Paihuano	Lodos activados	Riego, el efluente va a riego de la cancha municipal	Riego	527,04	6,1	30
Peralillo IV	Lodos activados	Río Elqui con Dilución	Riego	527,04	6,1	30
Vicuña	Laguna aireada	Río Elqui con Dilución	Riego	2125,44	24,6	100
Algarrobito	Lodos activados	Río Elqui con Dilución	Riego	328,32	2,6	3,8
La Serena	Emisario Submarino	Océano Pacífico	Riego - D. Urbana	82.080	519	950

Fuente: Elaboración propia en base a Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

De la tabla anterior se determina que PTAS la Serena Constituye el 96% del caudal total de agua de la PTAS, y es la única que no vuelve al sistema para su reutilización y no posee un tratamiento para su reúso. Las demás plantas de tratamiento y sus efluentes, al ser menores, no serán involucrados al presente trabajo; además en su mayoría vuelven indirectamente al sistema, beneficiándose otros usuarios aguas abajo. Del análisis de los SIG también se puede indicar que el 90% de la oferta hídrica es destinada al riego agrícola.

Esta determinación es complementaria al análisis ambiental preliminar de ubicación de plantas de reutilización realizado en el acápite 4.1.4.

### 4.3 APORTACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Para evaluar su potencial impacto en la lucha contra el cambio climático en el valle del Elqui, es necesario estimar la oferta hídrica procedente de plantas de tratamiento (PTAS) que por ubicación, puedan ser relevantes.

En la cuenca del río Elqui no existen registros oficiales de reutilización de aguas servidas. Sin embargo, sí existen experiencias en la región de Coquimbo (Chile) como se indicó en el subcapítulo 2.4. La condición de estrés hídrico de la zona ha generado diversos estudios, tanto privados como públicos, que permiten dimensionar la potencial prefactibilidad de incluir esta nueva aportación. Los tres sistemas de tratamiento del sistema Elqui descargan agua al mar a través de emisarios submarinos de las plantas de tratamientos de aguas servidas urbanas y rurales, que eventualmente podría ser aporte de nueva oferta hídrica al sistema (Dirección General de Aguas (DGA), 2020). Existen dos emisarios submarinos de descarga de aguas residuales provenientes del sistema sanitario en la región de Coquimbo: uno se encuentra emplazado en la ciudad de Coquimbo y otro en la ciudad de La Serena. Según (Jenkins, 2020) estos emisarios descargaron al mar, en el año 2018, aproximadamente  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta cantidad de caudal se traduce en un volumen de  $31 \text{ Hm}^3$ , siendo este un 10% de la demanda de la cuenca en ese momento.

Por otro lado, la SISS realizó una estimación en 2019 sobre el caudal vertido por las aguas servidas desde las ciudades de La Serena y Coquimbo, ascendiendo a un valor de  $1.500 \text{ l/s}$ ,

equivalente al riego de 4.000 hectáreas. Esto es equivalente a llenar el embalse El Bato (ciudad de Illapel, Coquimbo), de 25 Hm<sup>3</sup>, durante meses (SISS, [www.siss.gob.cl](http://www.siss.gob.cl), 2020)

La Fundación Chile (Fundación Chile, 2018) estima que el reúso de 1 m<sup>3</sup>/s podría aprovecharse en el riego de paltos, significando un beneficio de 37,8 millones de dólares al año, equivalente a 3.400 hectáreas de este cultivo. Se estima una inversión total (CAPEX) de 100 millones de euros (€) y un coste de operación (OPEX) de 0,36 €/m<sup>3</sup>.

Respecto a las aguas generadas en plantas de tratamiento de aguas servidas rurales, Fundación Chile en el año 2017 seleccionó las comunas de la región de Coquimbo donde existiera mayor viabilidad de instalar el sistema de reúso, considerando tres componentes críticos dentro de la línea base regional: demanda hídrica, zonas de estrés hídrico y número de PTAS rurales. Con base en estos criterios se determinó que en la provincia de Elqui, la comuna de Vicuña presenta el mayor potencial y prefactibilidad para evaluar la instalación de sistemas de reúso de aguas residuales tratadas.

La Fundación Chile realizó un estudio en 2017, que concluyó que el reúso del efluente vertido de las PTAS rurales es una opción que permite aprovechar un recurso cada vez más escaso en la región. Se estima que el coste de inversión de los sistemas es posible recuperarlo en un periodo de tiempo relativamente corto, por lo que concluye que es factible instaurar estas tecnologías en la región y también a lo largo del país (Fundación Chile, 2018).

#### 4.3.1 Cálculo de caudal reutilizable

Una vez analizada las PTAS en el acápite *ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PTAS*, se determina utilizar la planta de tratamiento que desemboca al mar como nueva fuente de agua para el sistema de la cuenca del Elqui, tomando en cuenta que es la única que no vuelve al sistema y supone un aporte real al sistema en su conjunto.

#### *Estimación de caudales de aguas residuales*

El sistema de recolección de aguas residuales es un sistema conjunto entre las ciudades de la Serena y Coquimbo, al igual que el de agua potable. Este sistema es el que recoge las aguas residuales y las vierte al mar por emisarios submarinos luego de un tratamiento. En estricto rigor y según los datos revisados el emisario submarino de La Serena se lleva el 97,1% del

caudal total de dicha ciudad y el 1,4% de la ciudad limítrofe de Coquimbo. El 1,5% restantes se estiman de localidades cercanas a la ciudad de La Serena, como son; San Ramón, Islón, Casa Verde, Algarrobito y Pan de Azúcar (SISS, [www.siss.gob.cl](http://www.siss.gob.cl), 2020).

La estimación de los caudales enviados por los emisarios posee una relación directa con las dotaciones estimadas en agua potable y alcantarillado, y con ellos es posible estimar la infraestructura necesaria de plantas de tratamiento y las tuberías de impulsión requeridas para transportar el agua hacia la zona de estudio.

#### *Sistema de reúso del agua actualmente vertida a través del emisario submarino La Serena*

El presente estudio propone la construcción de un sistema de reúso de aguas servidas tratadas, recuperadas de la descarga a través del emisario submarino de la ciudad de La Serena. El sistema se proyecta como una oferta hídrica principalmente agrícola debido a la calidad de aguas que se requieren para utilizar las aguas y el gasto económico que esto necesitaría. Por otro lado, de acuerdo con las exigencias de calidad para el uso de agua potable, el coste sería mayor, a diferencia de utilizarlas en labores industriales o actividades mineras de la zona o indirectamente para aumentar la sostenibilidad de los acuíferos. Las principales zonas de uso en riego agrícola con mayor déficit hídrico de acuerdo con lo indicado en (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) son la zona baja de la cuenca del río Elqui y al estero El Culebrón.

#### *Caudal de nueva oferta hídrica*

El caudal de diseño de la nueva oferta hídrica quedará definido por la estimación efectuada por la sanitaria Aguas del Valle sobre la facturación anual de aguas servidas para la comuna de La Serena. La proyección fue realizada por Aguas del Valle (SISS, Estudios Tarifarios 2016-2021, 2021) hasta el año 2035 y, a través de una proyección lineal, se han determinado sus caudales hasta el año 2050 en concordancia con las proyecciones del Modelo acoplado WEAP-Modflow del PEGH del Elqui. Dicha proyección se expone en la Tabla 4-7.

*Tabla 4-7. Facturación de aguas servidas anuales proyectadas comuna La Serena.*

<b>Año</b>	<b>Población Urbana INE (hab)</b>	<b>Población Territorio Operacional (hab)</b>	<b>Población Saneada AS (hab)</b>	<b>Clientes AS Total</b>	<b>Facturación AS Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>Facturación AS Total (l/s)</b>
2019	241.522	226.975	99,1%	224.988	86.562	14.314.633
2020	241.522	226.975	99,1%	224.988	86.562	14.644.633

Año	Población Urbana INE (hab)	Población Territorio Operacional (hab)	Población Saneada AS (hab)	Clientes AS Total	Facturación AS Total (m <sup>3</sup> /año)	Facturación AS Total (l/s)
2021	241.522	226.975	99,1%	224.988	86.562	14.944.633
2022	245.682	232.834	99,1%	230.796	88.762	15.279.348
2023	249.913	238.845	99,1%	236.754	90.961	15.611.965
2024	254.217	245.011	99,1%	242.866	93.161	15.942.493
2025	258.596	251.336	99,1%	249.136	95.361	16.270.940
2026	263.049	257.824	99,1%	255.567	97.561	16.597.318
2027	267.580	264.448	99,1%	262.165	99.761	16.921.634
2028	272.188	271.308	99,1%	268.933	101.961	17.243.898
2029	278.312	278.312	99,1%	275.876	104.161	17.564.120
2030	285.497	285.497	99,1%	282.998	106.360	17.882.309
2031	292.867	292.867	99,1%	290.303	108.560	18.198.473
2032	300.427	300.427	99,1%	297.798	110.760	18.512.623
2033	308.183	308.183	99,1%	305.485	112.960	18.824.766
2034	316.139	316.139	99,1%	313.372	115.160	19.134.913
2035	324.300	324.300	99,1%	321.462	117.360	19.443.073
2036	323.998	319.409	99,1%	325.602	119.560	19.795.178
2037	329.844	327.199	99,1%	332.481	121.759	20.116.471
2038	335.689	334.989	99,8%	339.361	123.959	20.437.765
2039	341.535	342.780	99,8%	346.240	126.159	20.759.058
2040	347.381	350.570	99,8%	353.119	128.359	21.080.351
2041	353.227	358.360	99,8%	359.999	130.559	21.401.644
2042	359.072	366.150	99,8%	366.878	132.759	21.722.937
2043	364.918	373.940	99,8%	373.758	134.959	22.044.230
2044	370.764	381.731	99,8%	380.637	137.158	22.365.523
2045	376.610	389.521	99,8%	387.516	139.358	22.686.816
2046	382.456	397.311	99,8%	394.396	141.558	23.008.109
2047	388.301	405.101	99,8%	401.275	143.758	23.329.402
2048	394.147	412.891	99,8%	408.155	145.958	23.650.695
2049	399.993	420.682	99,8%	415.034	148.158	23.971.988
2050	405.839	428.472	99,8%	421.913	150.358	24.293.281

Fuente: Elaboración propia en base a (SISS, Estudios Tarifarios 2016-2021, 2021).

El cálculo facturado se realizó utilizando el caudal medio de aguas servidas, que se calcula en base al caudal medio de agua potable (consumo domiciliario) multiplicado por un coeficiente de recuperación, estimado en un 80% según lo indicado en (Godoy Bravo, 2021). En la Figura 4-8 se presenta la gráfica con la proyección al año 2050 del caudal a reutilizar.

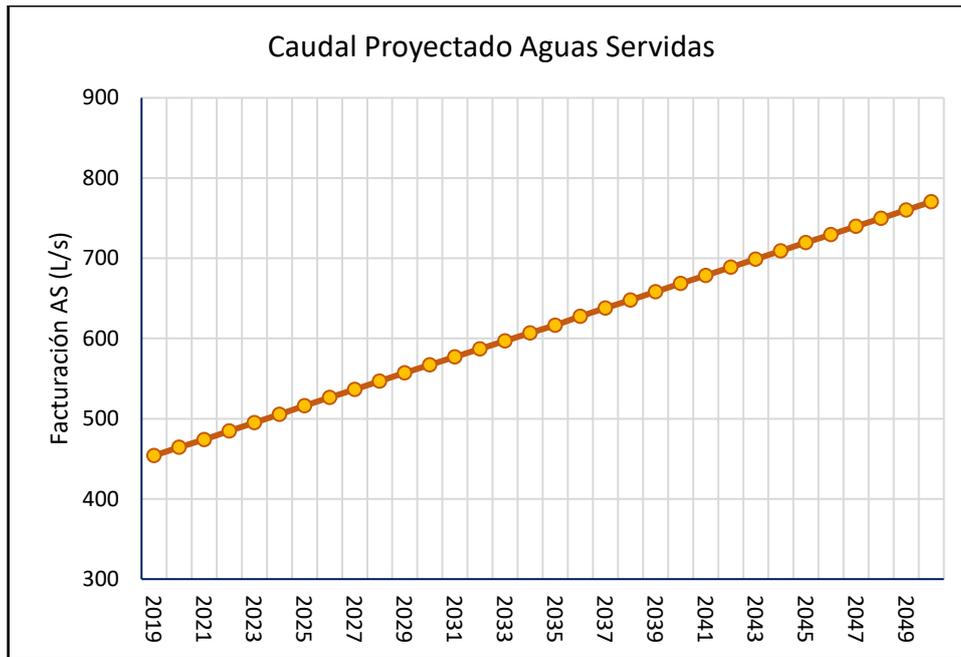


Figura 4-8. Caudal proyectado de aguas servidas en la comuna de La Serena desde 2019 a 2050.

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis anterior se estima para el año 2050 una facturación anual de 19.312.351 m<sup>3</sup>/año, lo que equivale a un caudal medio de 612 l/s, considerando un aumento promedio de 10 l/s en cada año. El caudal máximo para el periodo del estudio es 770 l/s, que será utilizado para el cálculo de los costes asociados a la impulsión.

#### 4.3.2 Selección de ubicación para la inclusión de nueva aportación

En la zona baja de la cuenca del Elqui, a juicio de gran parte de los actores locales, existe una preocupante y crítica situación respecto al acuífero del estero Culebrón a consecuencia de la cantidad de extracciones, muchas de ellas muy intensivas en el uso del agua, sumado a las extracciones fuera de la legalidad. No existe una adecuada fiscalización por parte de las autoridades competentes, principalmente la DGA, en torno a estas extracciones ilegales. Las recargas principales del acuífero Culebrón provienen de los excedentes de riego del Canal Bellavista; sin embargo, ya no son suficientes para aumentar el nivel freático a mínimo aceptables. Existe un riesgo de aumentar su contaminación por la poca dilución, y también puede ser afectado por intrusión salina debido a su cercanía con la costa. Estos problemas son percibidos por los regantes y actores de la cuenca debido a la sequía arrastrada desde el año 2010.

Se han seleccionado los canales más importantes del sector bajo de la cuenca del Elqui, para los cuales es posible incluir la recarga de aguas reutilizadas. Se han seleccionado los canales con mayor caudal, mayor cobertura de zonas de riego y mayores acciones de agua netas. En la Tabla 4-8. se indican los canales con dichas características para la zona del Elqui bajo.

*Tabla 4-8. Canales de regadío influyentes en la cuenca, zona Elqui bajo.*

Canal	Canales (WEAP Código)	Largo Canal Principal (Km)	Ribera	Sector	Q Max (l/s)	Acciones Netas
Herradura	CA_ELQ_21	47,25	I	Elqui Bajo	575,12	1.150,23
Bellavista	CA_ELQ_16	62,56	I	Elqui Bajo	2.206,22	3.677,04
El Romero	CA_ELQ_15	47,28	D	Elqui Bajo	680,09	1.115,86
San Pedro Nolasco	CA_ELQ_15	38,05	D	Elqui Bajo	825,46	844,53
La Pampa	CA_ELQ_19	17,53	I	Elqui Bajo	291,74	583,48
Juan Soldado o Jaramill	CA_ELQ_26	18,47	D	Elqui Desembocadura	360	360

Fuente: Elaboración propia en base a Sistemas de Información Geográfica de (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

De los canales presentados se preseleccionan, por su envergadura e influencia, el Romero, el Bellavista y el Herradura. Entre ellos se elimina el Romero por la lejanía con las plantas de tratamiento, niveles topográficos y el poco caudal de influencia en el sistema respecto al Bellavista. Este último tiene más influencia en las zonas de riego que el Herradura; además influye a través de la infiltración en mayor medida en los acuíferos sobreexplotados, ya que es un canal excavado en tierra y de gran extensión con filtraciones del orden del 30% según el modelo WEAP (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

En este sentido, el canal Bellavista es el canal seleccionado para ser intervenido con la inclusión de caudal de aguas residual tratadas. Este canal de 121 km de longitud total se divide en: 1 canal matriz, 18 derivaciones y 4 subderivaciones, es abastecido por los desmarques del embalse Puclaro, el cual puede abastecer el 100% de lo demandando por el canal Bellavista, con un 50% de su capacidad almacenada, y también se abastecen de otros afluentes menores que drenan al río Elqui y de algunos acuíferos costeros (AquaTerra, 2016).

#### 4.3.3 Identificación de zonas de riego

Se ha realizado un análisis en base a los resultados del modelo WEAP del PEGH considerando los escenarios existentes en este, en particular el escenario E1, que es el escenario base sin medidas de gestión o acciones incorporadas. Se tomaron en cuenta la selección de canales y las zonas de riego que son realmente afectadas por el canal dentro del modelo. Lo anterior se representa gráficamente en la Figura 4-9, de acuerdo con el Modelo WEAP y sus topologías.

Se utilizan los datos de demanda de riego, además del caudal de reutilización, considerando las pérdidas por conducción, estimadas en promedio de 15%. La suma de caudales entrega la oferta que tendría el canal Bellavista con la reutilización de aguas servidas. Existe una pérdida por la conducción de la canal existente estimada de 30% por (Dirección General de Aguas (DGA), 2020), que infiltra en el acuífero Elqui bajo. Por otro lado, el excedente de la satisfacción del 100% de la oferta, será destinado a incrementar los flujos al acuífero Culebrón que esta indirectamente influenciado por el canal Bellavista En la Figura 4-9. se presenta un ejemplo de la influencia parcial del Canal Bellavista en las topologías del modelo WEAP.

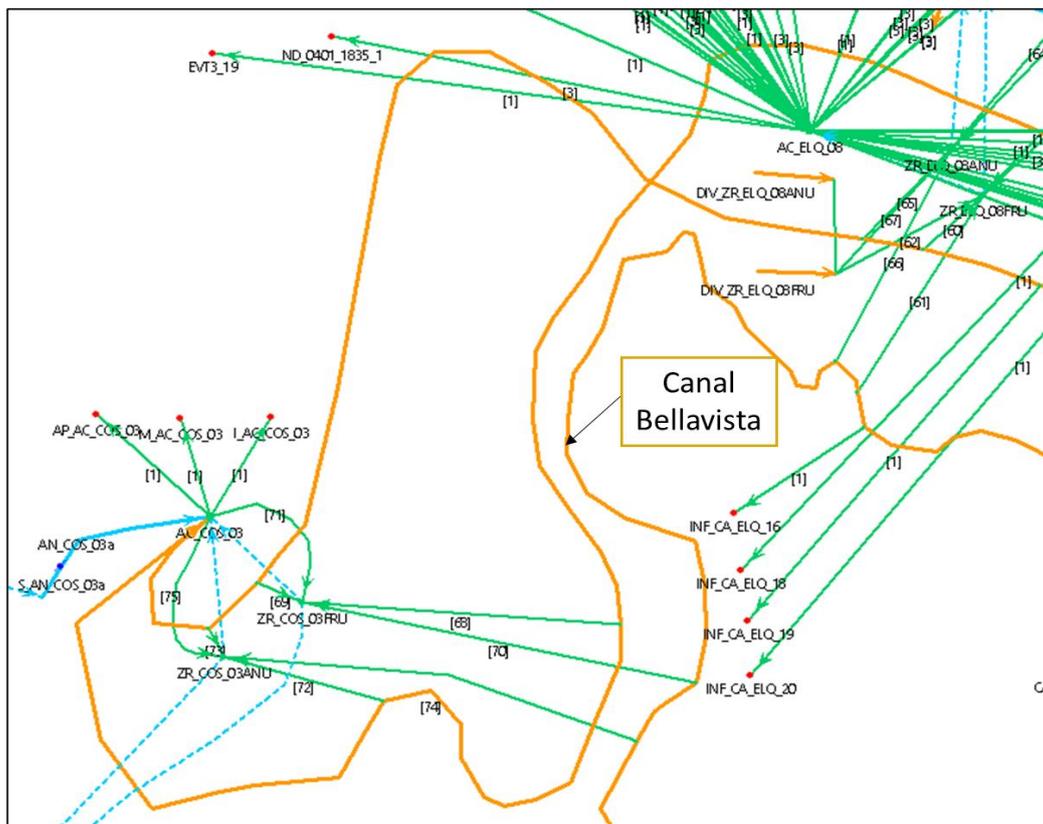


Figura 4-9. Zonas de riego canal Bellavista.

Fuente: Modelo WEAP del PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020) .

Se analizaron las siguientes Zonas de Riego (ZR) que están vinculadas sector de Elqui Bajo y Zona Costera, que tienen directa influencia en la entrega de agua por parte del canal Bellavista. Los datos fueron extraídos del modelo WEAP del PEGH:

- ZR\_ELQ\_08FRU
- ZR\_ELQ\_08ANU
- ZR\_COS\_03FRU
- ZR\_COS\_03ANU

Luego de estimar los déficits de demanda, se incluyen los caudales de reutilización expuestos anteriormente en el acápite 4.3.1, para así generar una nueva oferta hídrica que satisfaga los déficits de demanda.

Además de considerar las zonas de riego antes mencionadas, existe un factor ambiental importante para complementar la decisión de incluir la aportación desde las PTAS en el sector, y es que el estero El Culebrón es una zona o sub-subcuenca que corresponde a un curso de agua superficial natural torrencial semipermanente, de distancia corta, ubicado en el sector sur de la cuenca del Elqui, específicamente en la ciudad de Coquimbo. La dirección de su flujo es de sur a norte, desembocando en el mar. Existe un humedal o laguna natural en su tramo final, donde existen algunas fases de agua salada y otras de agua dulce. Este humedal es considerado como un elemento importante para la conservación de humedales costeros de la región de Coquimbo. Su cuenca es exorreica y preandina, sus escurrimientos provienen de precipitaciones y de los excedentes generados por el Canal Bellavista (canal seleccionado) que conduce agua desde el río Elqui aproximadamente entre 0,38 y 0,61 m<sup>3</sup>/s en promedio (Avilés, 2018). El humedal se encuentra en peligro, considerando el aporte que tiene el canal y el acuífero El Culebrón.

#### 4.4 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y OBTENCIÓN DE DATOS FUTUROS PARA LA ZONA DE ESTUDIO

Entre el año 2017 y 2018, la Dirección General de aguas presentó una actualización del balance hídrico nacional (Dirección General de Aguas (DGA), 2018c). El período climático analizado comprende un escenario base de 1985-2015 y un escenario futuro de 2030 a 2060. Dicha

actualización corresponde a un análisis que no se realizaba desde el año 1987 con escenarios base en los años 1950 y 1980. Dicho análisis no consideraba variables de cambio climático.

Los valores obtenidos en esta actualización corresponden al comportamiento de cada variable climatológica durante los escenarios de cambio climático, en modelos disponibles. En el “Anexo F, Sección 3.2.1” del PEGH del Elqui (Dirección General de Aguas (DGA), 2020), se proporcionan métodos detallados para determinar la variabilidad climática relacionada con la precipitación, temperatura y caudal.

#### 4.4.1 Modelos de Circulación General para escenarios de cambio climático (CC)

Después de utilizar los criterios descritos en la metodología se han seleccionado cuatro MCG. Como se muestra en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, estos modelos fueron agrupados en cuatro condiciones de sensibilidad climática, desde baja extrema hasta alta extrema. Esta sensibilidad se describe en (Dirección General de Aguas (DGA), 2017) y se define como la variación en la temperatura u otras variables climáticas, en un sistema en equilibrio, en respuesta a un forzamiento radiativo, dependiendo del estado de clima inicial. Además (Sherwood, 2014) demuestra que una superficie con hielo y una atmósfera con concentraciones de CO<sub>2</sub> influyen en la sensibilidad.

Luego de realizar este análisis de sensibilidad se seleccionan los cuatro Modelos de Circulación General (MCG) que se adecuan más al territorio de estudio. Estos se presentan en la Tabla 4-9 (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

*Tabla 4-9. MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (Dirección General de Aguas (DGA), 2017c).*

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	Baja Extrema

Modelo	Institución	Sensibilidad climática
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CMSA-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Alta extrema

Fuente: (Dirección General de Aguas (DGA), 2017c).

#### 4.4.2 Obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio

##### Precipitación

En la Tabla 4-10 se expone un resumen de los resultados numéricos considerando el modelo o periodo, el promedio de precipitación y sus estadísticos. Se observa una inclinación estadísticamente significativa de disminución de las precipitaciones respecto al período histórico en los cuatro modelos de circulación general (MCG). MIROC es el modelo más pesimista, con una disminución de 16 mm/año. Los modelos CSIRO, IPSL y MIROC predicen una disminución menor de la variabilidad interanual en comparación con períodos históricos. La distribución espacial de la precipitación de la cuenca se basa en la resolución espacial de 5 x 5 km/pixel (Dirección General de Aguas (DGA), 2018c). Se puede decir entonces que esta proyección de decadencia de precipitaciones es homogénea para la cuenca del río Elqui.

Tabla 4-10. Estadísticos de precipitación anual para el período histórico y 4 MCG.

Modelo / Período	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación (-)	Tau (-)	p valor (-)
Histórico	110	81	0,74	-0,108	0,356
CCSM4	106	90	0,85	-0,070	0,355
CSIRO	107	84	0,79	-0,095	0,204
IPSL	101	58	0,57	-0,193	0,010
MIROC	94	62	0,66	-0,240	< 0,01

Fuente: (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

### Temperatura

Al igual que en la precipitación los resultados numéricos se muestran en la Tabla 4-11. Se aprecia una inclinación estadísticamente importante en el aumento de temperaturas en el período histórico. Existen tendencias similares en los cuatro MCG; no obstante, no hay ninguna que sea estadísticamente significativa. En general, se estima un incremento de 0,54 °C a escala de cuenca. Se observan aumentos en la variabilidad interanual de la temperatura, ya que las desviaciones estándar alcanzadas para los MCG están próximas al doble de la desviación estándar adquirida para el período histórico.

Tabla 4-11. Estadísticos de temperatura anual para el período histórico y 4 MCG.

Modelo / Período	Promedio (°C)	Desviación estándar (°C)	Coefficiente de variación (-)	Tau (-)	p valor (-)
Histórico	12.53	0.53	0.04	-0.04	0.75
CCSM4	13.01	0.88	0.77	0.77	< 0,01
CSIRO	13.11	0.98	0.76	0.76	< 0,01
IPSL	12.98	0.98	0.79	0.79	< 0,01
MIROC	12.99	0.85	0.76	0.76	< 0,01

Fuente: (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

### Caudal

La Tabla 4-12. resume los resultados numéricos referido a los caudales al igual que en los expuestos en la precipitación y temperatura. Aunque hubo una tendencia a la baja durante el período histórico, no se considera estadísticamente significativa según la prueba de Mann-Kendall (valor de  $p < 0,05$ ). Los cuatro modelos de circulación general muestran una tendencia de flujo decreciente, que solo es significativa para el caso de CSIRO. Los cuatro modelos de circulación general fueron consistentes en mostrar disminuciones de caudal, y se predijo una caída media de 2,675m<sup>3</sup>/s equivalente a un 13%. Los cuatro modelos predicen una disminución en la volatilidad de los flujos de un año a otro. La disminución de flujo más pronunciada se observó en la parte sur de la cuenca, alcanzando -0,03 mm en el caso de MIROC.

Tabla 4-12. Estadísticos de caudales anuales simulados para el período histórico y 4 MCG.

Modelo / Período	Promedio (m <sup>3</sup> /s)	Desviación estándar (m <sup>3</sup> /s)	Coficiente de variación (-)	Tau (-)	p valor (-)
Histórico	20.2	13.2	0.65	-0.38	< 0,01
CCSM4	18.4	15.4	0.84	-0.16	0.04
CSIRO	18.7	14.0	0.75	-0.08	0.26
IPSL	17.4	9.3	0.54	-0.28	< 0,01
MIROC	15.6	10.3	0.66	-0.34	< 0,01

Fuente: (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

A continuación, en los siguientes apartados y figuras se exponen los resultados hidrometeorológicos de la zona de estudio de El Culebrón, en promedio y series de datos.

#### Resultado de datos temperatura en El Culebrón

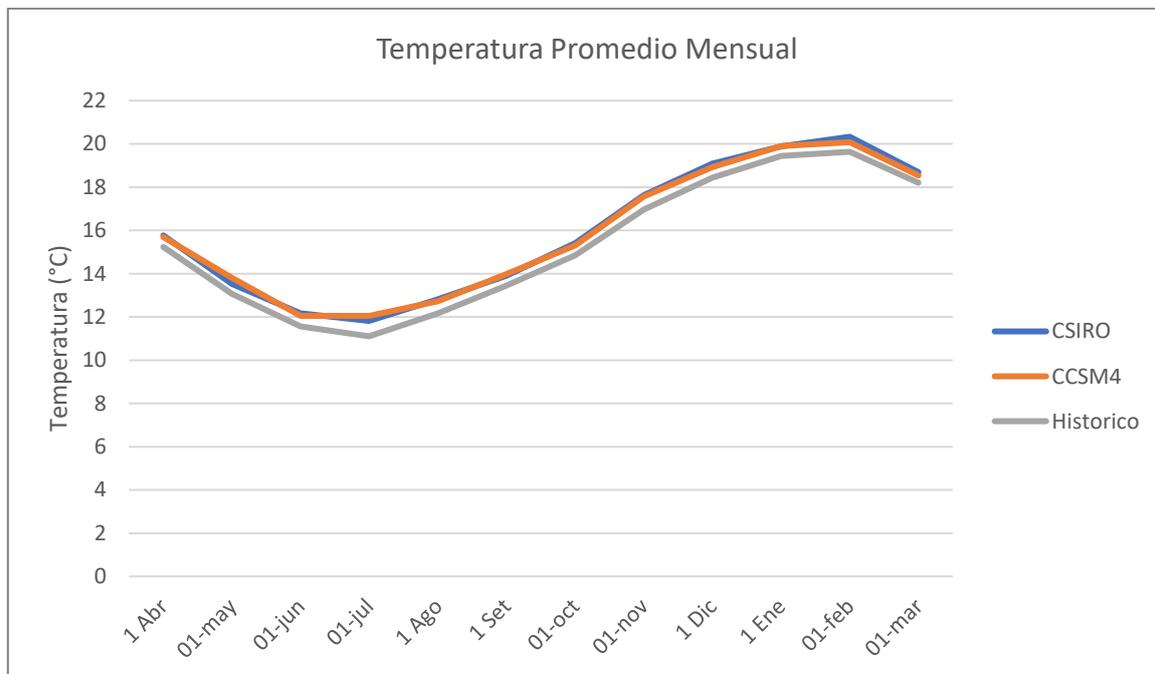


Figura 4-10. Temperatura promedio mensual estero El Culebrón.

Fuente: Elaboración propia en base a (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Resultado de datos Precipitación

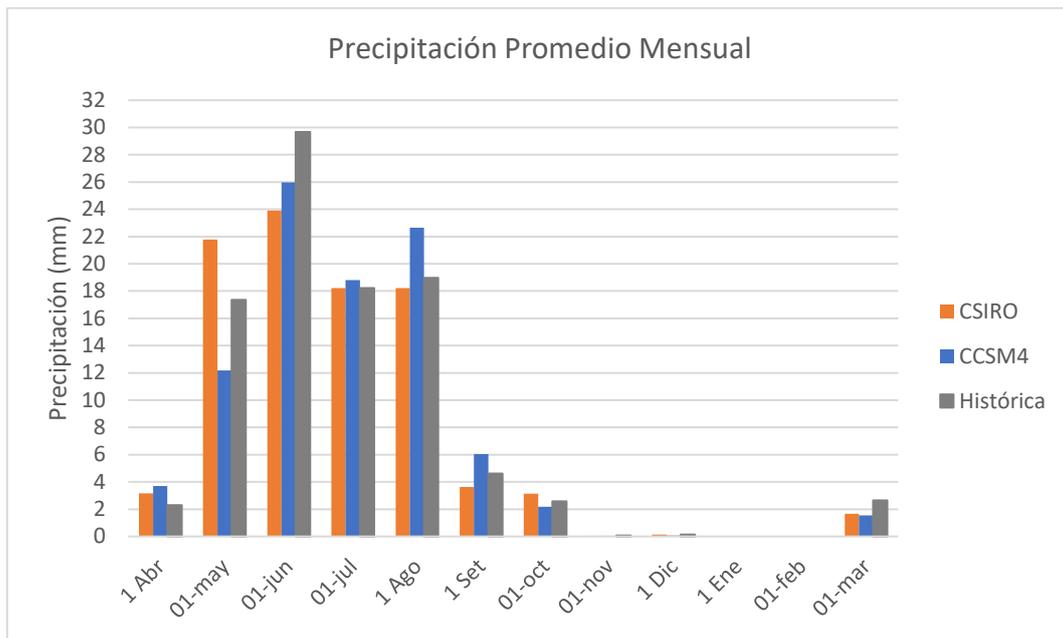


Figura 4-11. Precipitación promedio mensual estero El Culebrón.

Fuente: Elaboración propia en base a (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Resultado de datos caudales

El resultado de los caudales de la cuenca en la desembocadura fue presentado en Figura 4-6. Registro de Caudal de desembocadura simulado.

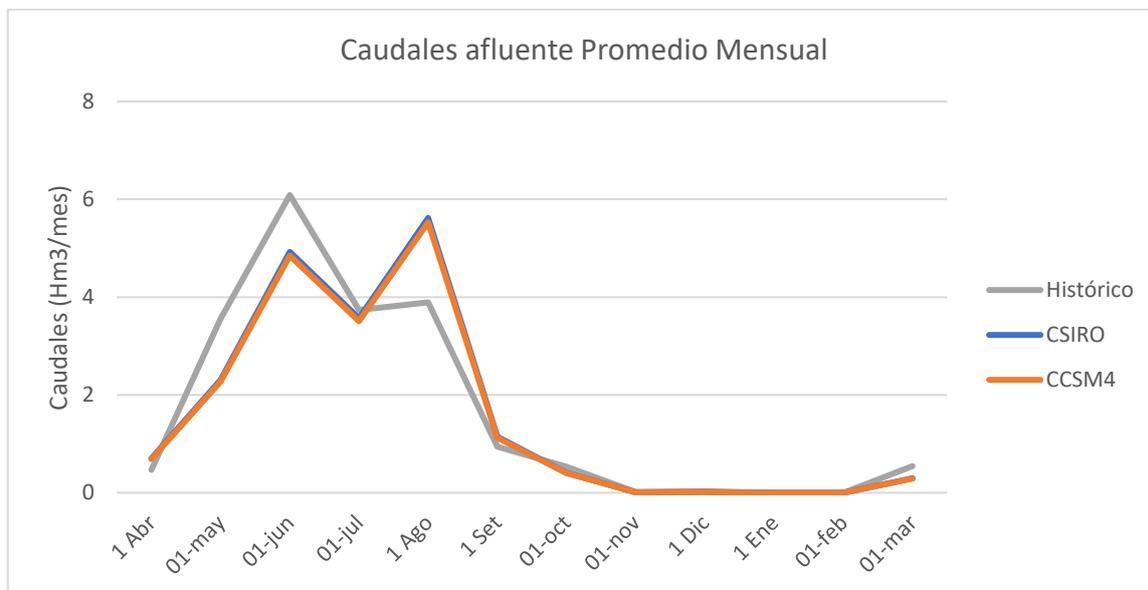


Figura 4-12. Caudales promedio mensual estero El Culebrón.

Fuente: Elaboración propia en base a (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

De las gráficas anteriores podemos comentar que la temperatura en los MCG CSIRO y CCSM4 aumenta en 3,8% y 3,6% respectivamente en referencia la histórica en el sector de estudio, con una desviación estándar promedio mensual de 0.331 °C. Del mismo modo, pero a la inversa, la precipitación disminuye en 2,8% para el MCG CSIRO y un 3,5% para el CCSM4, con una desviación estándar promedio mensual de 1,12 mm.

Los caudales afluentes en el sector El Culebrón tienen consideración una disminución de sus caudales en 4,1% para el MCG CSIRO y un 5,7% para el CCSM4, la desviación estándar promedio mensual se estima de 0,25 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.5 NUEVOS ESCENARIOS DE GESTIÓN INCORPORANDO REUTILIZACIÓN DE PTAS PUNTUALIZADO EN ESTERO EL CULEBRÓN.

En el presente acápite desarrollan las hipótesis que llevan a generar los escenarios de gestión hídrica, considerando la nueva oferta hídrica de reutilización proyectada y presentada en los subcapítulos anteriores. Se consideraron las demandas solicitadas por el sistema, y dos de los Modelos de Circulación Global (MCG) en referencia a proyecciones de cambio climático desarrolladas en (Dirección General de Aguas (DGA), 2017) y explicadas resumidamente en el subcapítulo anterior.

El modelo hidrológico del PEGH generado en WEAP se creó como una herramienta para la toma de decisiones visualizando la dinámica de flujo superficial y subsuperficial de la cuenca del río Elqui, a partir de modelos numéricos existentes y con apoyo de la DGA. Más concretamente, se abordaron los siguientes aspectos:

- Balances histórico y actualizado
- Construcción del modelo acoplado superficial - subterráneo
- Oferta sustentable
- Sustentabilidad de sectores acuíferos
- Caso futuro para escenario climático
- Simulación de escenarios de gestión

En el Anexo H del PEGH del Elqui, (Dirección General de Aguas (DGA), 2020), se describe numéricamente el Balance hídrico que realiza el Modelo WEAP. Este modelo es de donde se

extrajeron los datos para generar un modelo simplificado de la zona de estudio seleccionada para la inclusión de la reutilización de aguas, que es el canal Bellavista en la zona del estero El Culebrón.

Como antecedente relevante, el estero El Culebrón fue seleccionado para aplicar por primera vez en Chile el método creado por la Dirección General de Aguas para la definición de sector hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC), una definición legal de un sector de acuífero, necesaria para crear el marco legal para utilización práctica del aprovechamiento común entre aguas superficiales y subterráneas. El estudio y los resultados, así como el método, fueron presentados en Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional en el año 2014. (Avilés, 2018). A continuación se expondrá una descripción del modelo de gestión construido en este trabajo, que ha sido denominado “Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón” (creación propia).

#### 4.5.1 Hipótesis y descripción del Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón

La hipótesis del modelo se basa en considerar al canal Bellavista como un trasvase desde el sistema del río Elqui hacia el estero El Culebrón. Este trasvase se traduce en que el caudal generado y tratado por la PTAS se incluye en el canal Bellavista, a través de impulsiones de tuberías de alta presión, para subsanar los déficits de demanda expuestos anteriormente en el sector, siendo este el más vulnerable debajo de la cuenca, y es el más cercano a la condición de rehúso por parte de las zonas de riego. Para analizar la modelación de escenario se ha utilizado el siguiente esquema topológico presentando en la Figura 4-13.

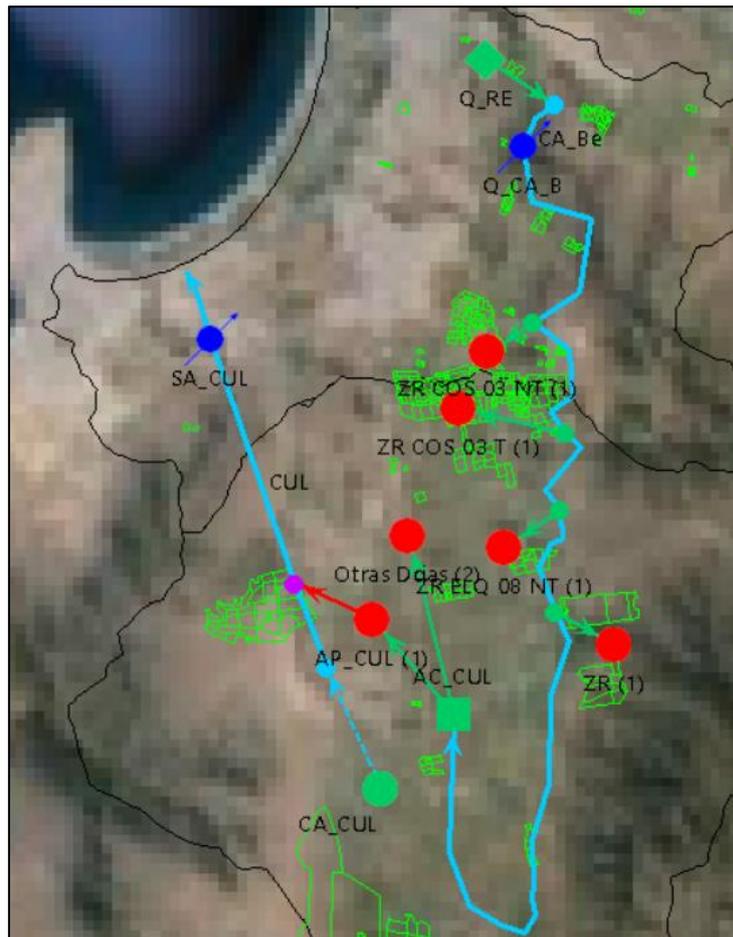


Figura 4-13. Topología de modelo en zona del estero El Culebrón.

Fuente: Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón.

El modelo se generó en base a una cantidad de supuesto claves, que son la base de la modelación. En la Figura 4-14, se presenta una imagen extraída del modelo WEAP en donde se expone la topología en forma de árbol.

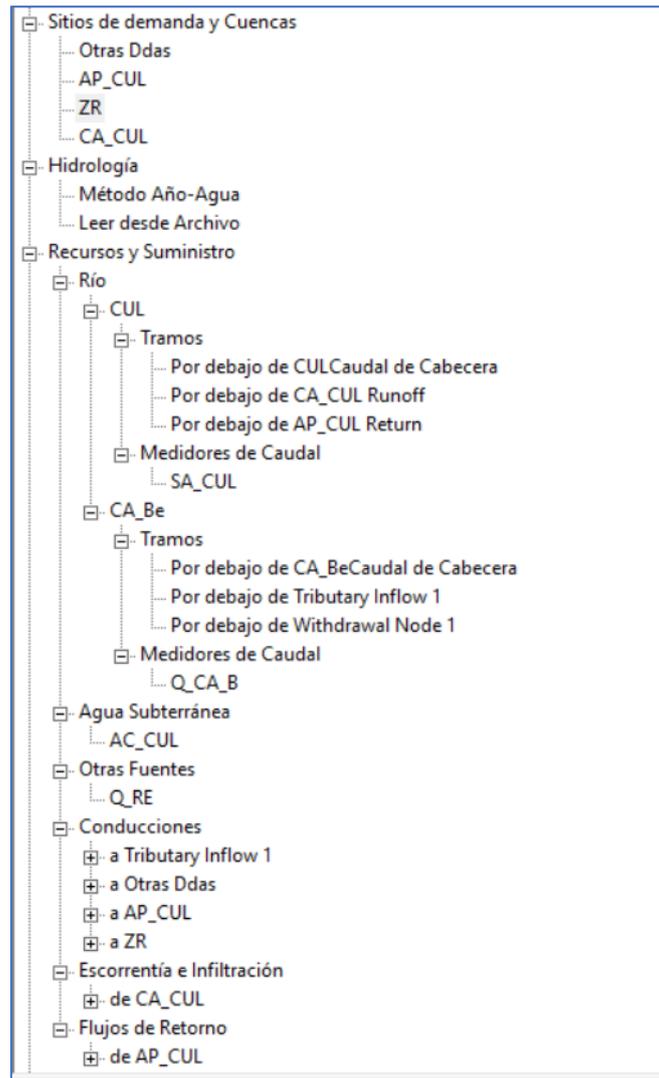


Figura 4-14. Supuestos clave del modelo en zona del estero El Culebrón.

Fuente: Modelo WEAP Modificación Cuenca Elqui – El Culebrón.

A continuación se detallan las características principales de los supuestos claves enumerados anteriormente.

#### Sitios de demanda y Cuencas:

- Otras Ddas: Demandas de pequeña minería e industria. Su uso es de  $0,5 \text{ Hm}^3$  anuales, con un consumo de 100% en todos los años, sin pérdidas y con prioridad 2 como orden de abastecimiento.
- AP\_CUL: Demanda de Agua Potable en el sector del Culebrón. Su consumo anual se asume constante y asciende a  $0,313 \text{ Hm}^3$ , con consumo del 100%. Sin pérdidas con prioridad 1.

- ZR: Zonas de riego identificada con el caudal de demanda en  $m^3/s$ . Se considera un consumo del 100%, sin pérdidas y Prioridad 1. Se identifica la Zona COS (Costera) y ELQ (Elqui bajo).
- CA\_CUL: Unidad Hidrológica. Uso de suelo, área 183 ha.

#### Hidrología:

Se utiliza el Método año-agua. Se puede ir cambiando los años con factores que describen los años húmedos y secos con ponderaciones desde 1 a 5. En este caso particular los escenarios han sido considerados uniformemente en condición normal (valor=3).

#### Recursos y Suministro:

##### Río

- CUL: Caudal Afluyente desde la Unidad Hidrológica. CA\_CUL. Los caudales son calculados por WEAP.
- CA\_Be: Los caudales son calculados por WEAP

#### Agua subterránea:

Capacidad de almacenamiento y máxima extracción,  $186 \text{ Hm}^3$  de volumen de capacidad.

#### Otras Fuentes:

Q\_RE, Afluyente de la reutilización de las PTAS.

#### Conducciones:

Se mide en  $m^3/s$  y corresponde a la representación de canales de regadío que transportan los caudales a las zonas de demanda.

#### Escorrentía e Infiltración

Porcentajes de Canal afluyente, se asume que el total del canal afluyente para cada destino es del 100%.

### Flujos de retorno

Porcentajes del total de caudal efluente para cada zona identificada con retorno. En este caso particular se considera como retorno el agua acumulada en el acuífero del Culebrón que va aportar las zonas de desembocadura y humedal del estero El Culebrón.

#### 4.5.2 Calibración del modelo

La calibración viene dada por los datos utilizados en Modelo WEAP del PEGH (acoplado con Modflow), que son los datos utilizados en el Modelo del Estero El Culebrón. Para luego ser verificado con el estadígrafo de la estación de aforo del estero El Culebrón.

La calibración de la componente subterránea, de la modelación ajustadas a los valores observados. El resumen de estadígrafos se presenta en la Figura 4-15. Esta calibración un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0,9999, muy ajustado.

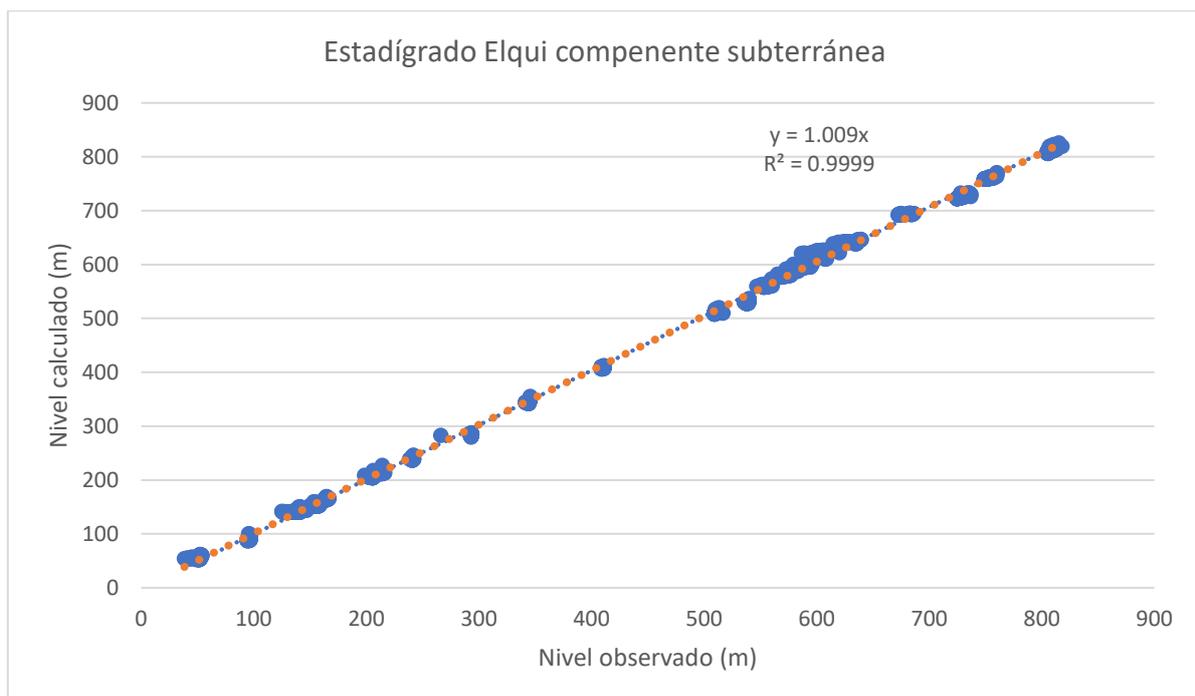


Figura 4-15. Calibración de niveles de pozos del modelo acoplado.

Fuente: Modelo WEAP PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Respecto a la componente superficial y en términos generales se verifican las medidas estadísticas del modelo acoplado en las estaciones de aforo. Estos indicadores se presentan en la siguiente tabla resumen.

Tabla 4-13. Indicadores de Calidad de Calibración para el periodo histórico (1990 -2019) en las estaciones DGA de la cuenca.

Estación / Indicador	KGE	NSE	R2	PBIAS
Claro Rivadavia	0,54	0,60	0,66	-22,29
Cochiguaz El Penon	0,52	0,61	0,71	-29,69
Culebrón El Sifón	-1,90	-8,56	0,46	239,07
Derecho en Alcohuaz	0,29	0,38	0,51	-29,44
Elqui Algarrobal	0,59	0,64	0,67	-2,73
Elqui en el Almendral	0,64	0,57	0,57	7,64
Elqui en La Serena	-0,1	-0,14	0,16	87,64
Elqui Salida Embalse	0,59	0,51	0,60	22,34
La Laguna Salida Embalse	0,93	0,92	0,93	5,74
Toro en La Laguna	0,29	0,21	0,26	-12,96
Turbio en Varillar	0,79	0,76	0,80	18,34

Fuente: Modelo WEAP PEGH (Dirección General de Aguas (DGA), 2020).

Es importante destacar que en el sector de la desembocadura, estación Elqui La Serena no pudo mejorar su calibración viene determinado pro el modelo origen previo al acople. Para mejorarlo se requiere un trabajo mayor y depende de todo el modelo para su ajuste.

Para comprar la bondad del modelo realizado en el estero El Culebrón se ha realizado un estadígrafo en la Estación fluviométrica o de aforo El Sifón cercano a la desembocadura del estero.

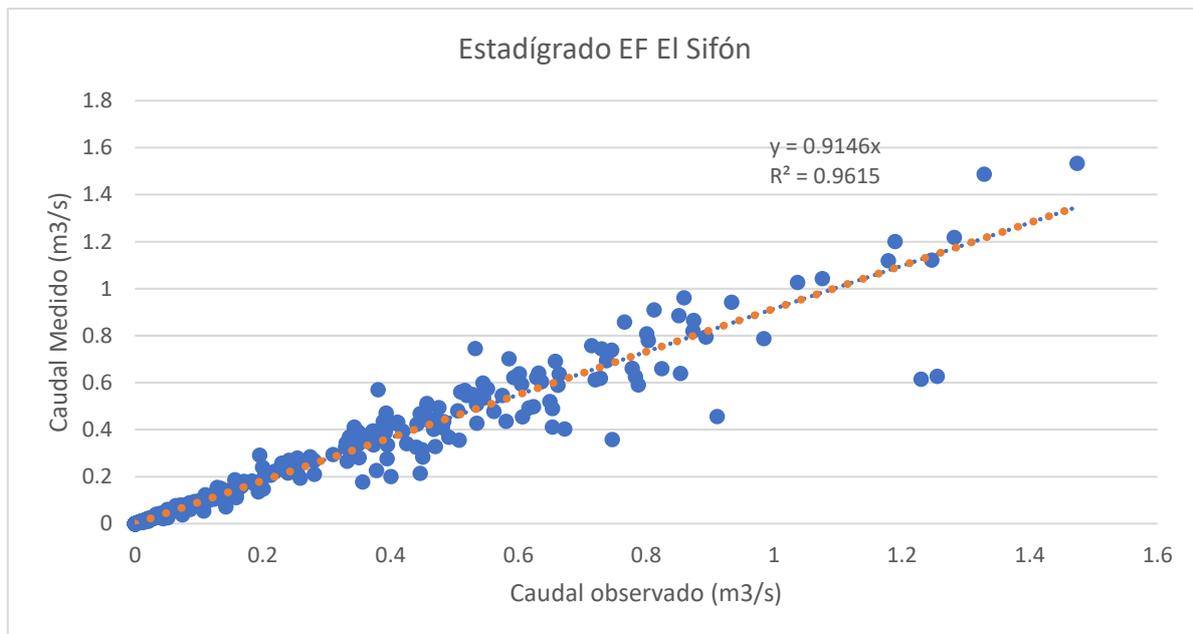


Figura 4-16. Estadígrafo de estación fluviométrica El Sifón

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.3 Resultados del Modelo Estero El Culebrón sin incluir reutilización de aguas residuales

El modelo incluye dos escenarios de MCG con dos escenarios de inclusión de caudal de reutilización. Se simulan en dos archivos de modelo distintos debido a la generación de sus archivos de resultado, pero con los mismos datos de entrada de acuerdo con su MCG y la inclusión del caudal de estos. A continuación, se presentan los resultados del escenario de gestión para cada MCG de cambio climático (CC en adelante).

##### Escenario CSIRO

En el siguiente gráfico se muestra la demanda de riego y sus déficits o demanda insatisfecha, como lo describe WEAP, de las zonas identificadas. Se observa un aumento progresivo de demanda insatisfecha o déficit en los periodos estivales en todos los años hasta el 2050, llegando a picos sobre los 17 hectómetros cúbicos anuales. Sin embargo, existen años como el 2037 y el 2047 donde se aprecia una disminución notable de los déficits provocada por un aumento de precipitaciones en esos periodos.

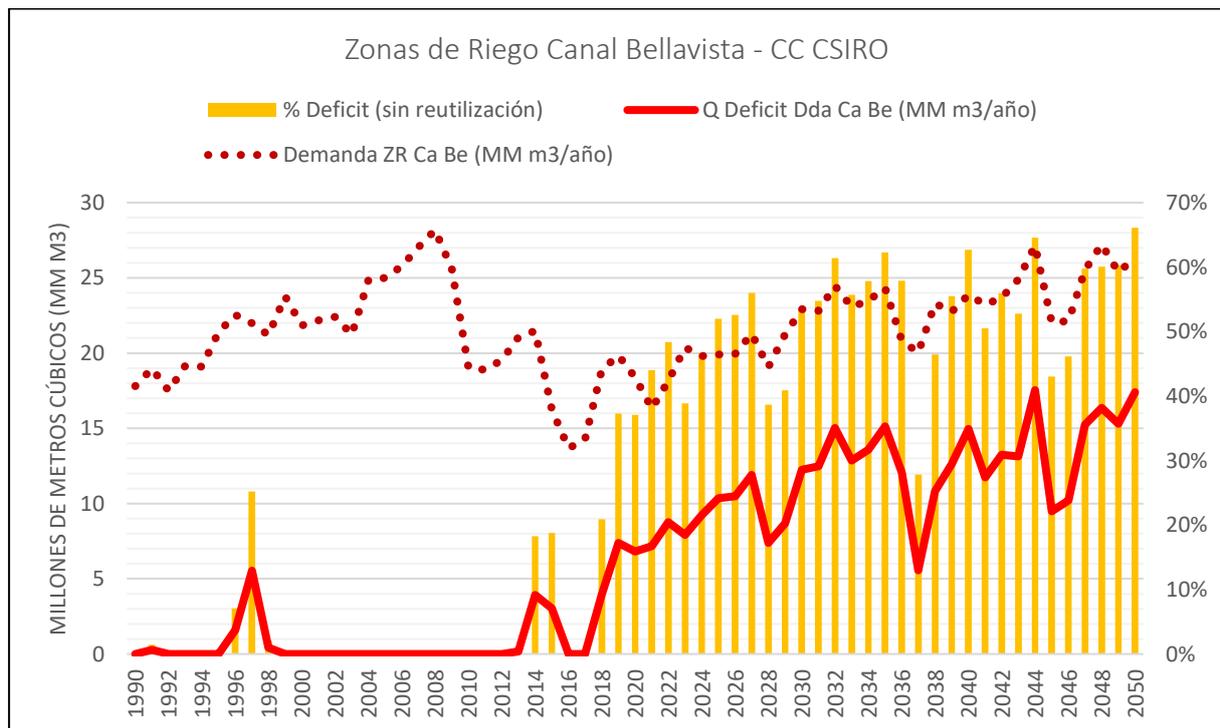


Figura 4-17. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: Déficit de demanda, caudal de demanda.

Fuente: Elaboración propia.

Escenario CCSM4

Al igual que el escenario anterior, el siguiente gráfico se expone la demanda de riego y el déficit o demanda insatisfecha de las zonas identificadas. Se observa un aumento progresivo de demanda insatisfecha en los periodos estivales en todos los años, hasta el 2050, llegando a picos sobre los 16 hectómetros cúbicos anuales con un promedio de 49% de déficit de demanda anual.

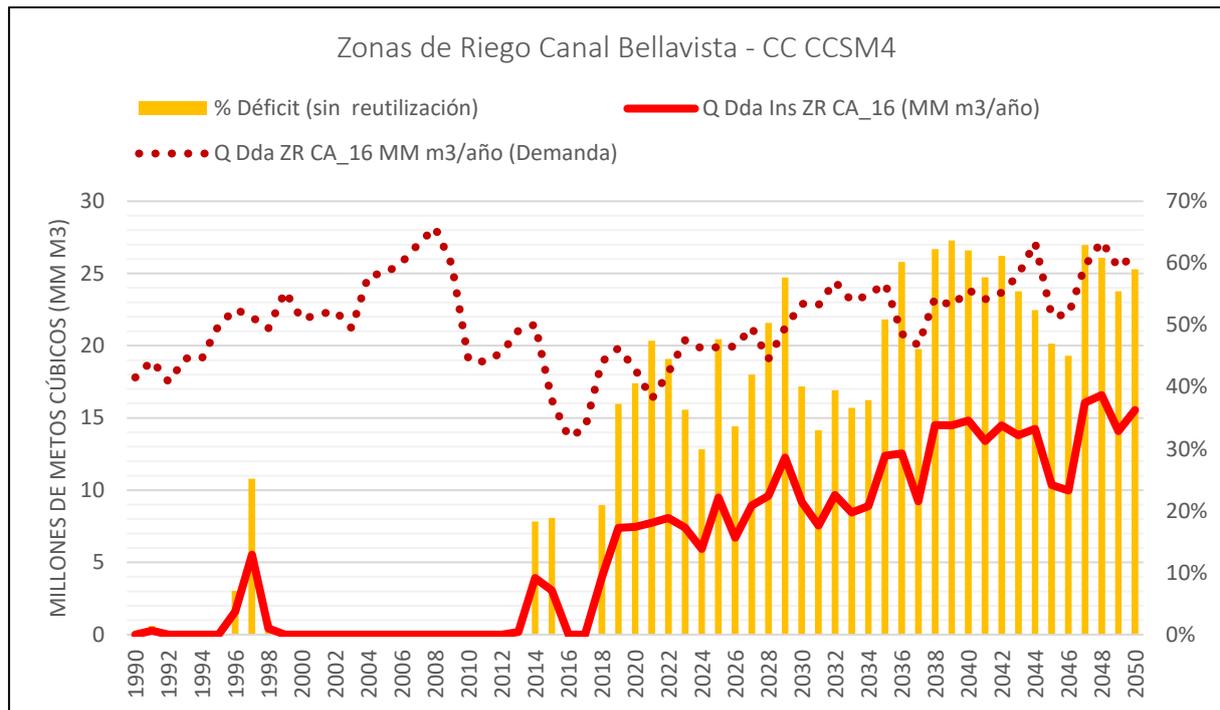


Figura 4-18. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: oferta de riego, caudal de reuso, caudal de demanda y oferta extra.

Fuente: Elaboración propi..

Déficit de demanda de Riego.

En Figura 4-19 se presenta una gráfica de áreas en la que se observa el comportamiento del déficit de demanda respecto al total de demanda en los dos escenarios de cambio climático. Se puede concluir que la variabilidad no es abruptamente superior entre el MCG CSIRO y el MCG CCSM4. Sin embargo, en promedio y observando las áreas de la gráfica se ve claramente que el MCG CSIRO es una condición más desfavorable que el de CCSM4.

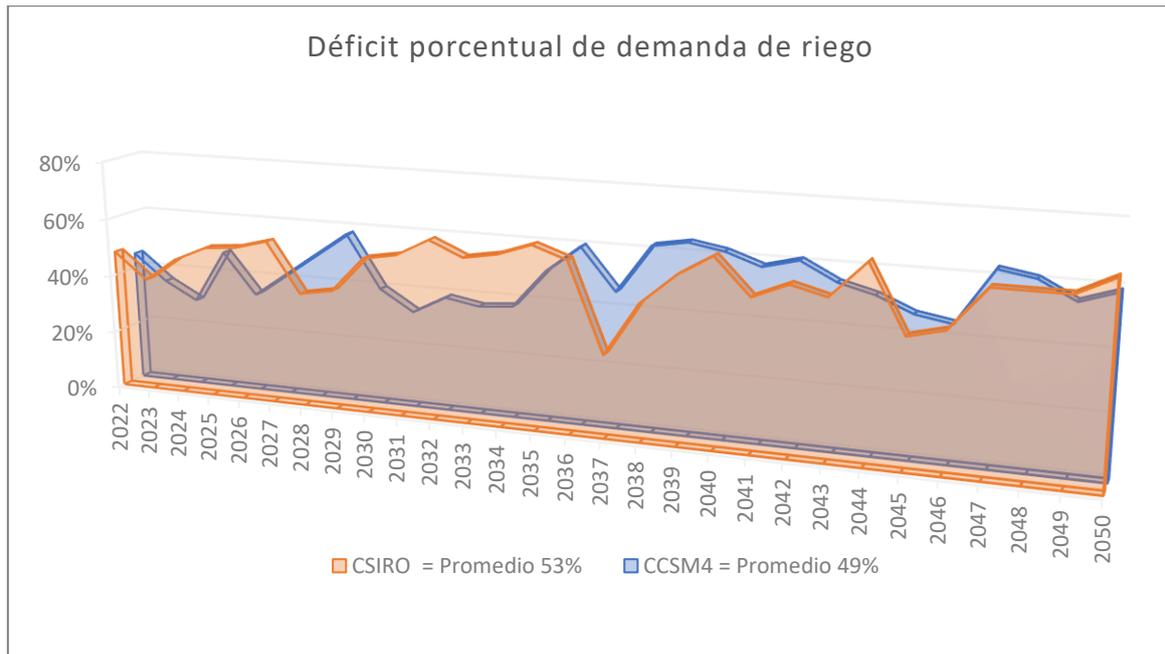


Figura 4-19. Gráfica de déficit porcentual entre MCG.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.4 Resultados del Modelo Estero el Culebrón incluyendo reutilización de aguas residuales

##### Escenario CSIRO con reutilización de aguas servidas

Se ha incluido el caudal de reutilización a la oferta de riego, considerando un 15% de pérdidas en la conducción. Se espera suplir el déficit en un 100%.

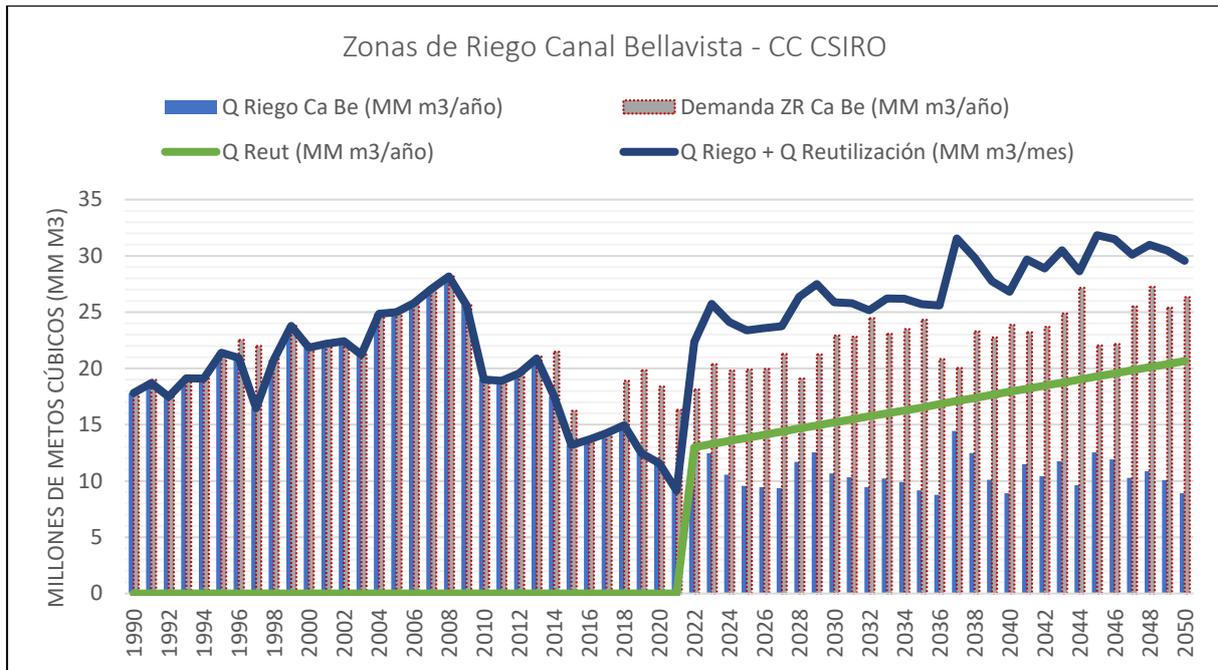


Figura 4-20. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: oferta de riego, caudal de reúso, caudal de demanda y oferta extra.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-21 se observa que la demanda es satisfecha en un 100% desde el 2022 con la nueva oferta, generando un excedente de entre 0,71 y 11,52 hectómetros cúbicos al año que podrá ser aprovechado por los acuíferos vinculados a estas zonas de riego.

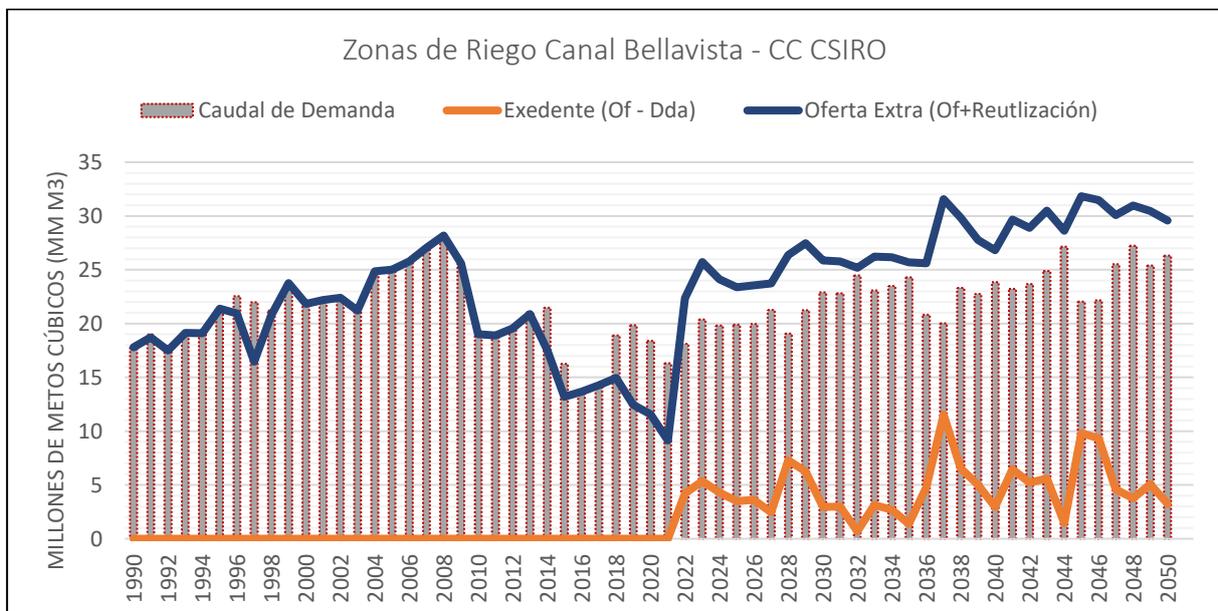


Figura 4-21. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CSIRO, considerando: caudal de demanda, excedente, y oferta extra.

Fuente: Elaboración propia.

Escenario CCSM4 con reutilización de aguas servidas

Se ha incluido el caudal de reutilización a la oferta de riego, considerando un 15% de pérdidas en la conducción, se espera suplir la demanda de riego insatisfecha o déficit en un 100% al igual que el escenario anterior.

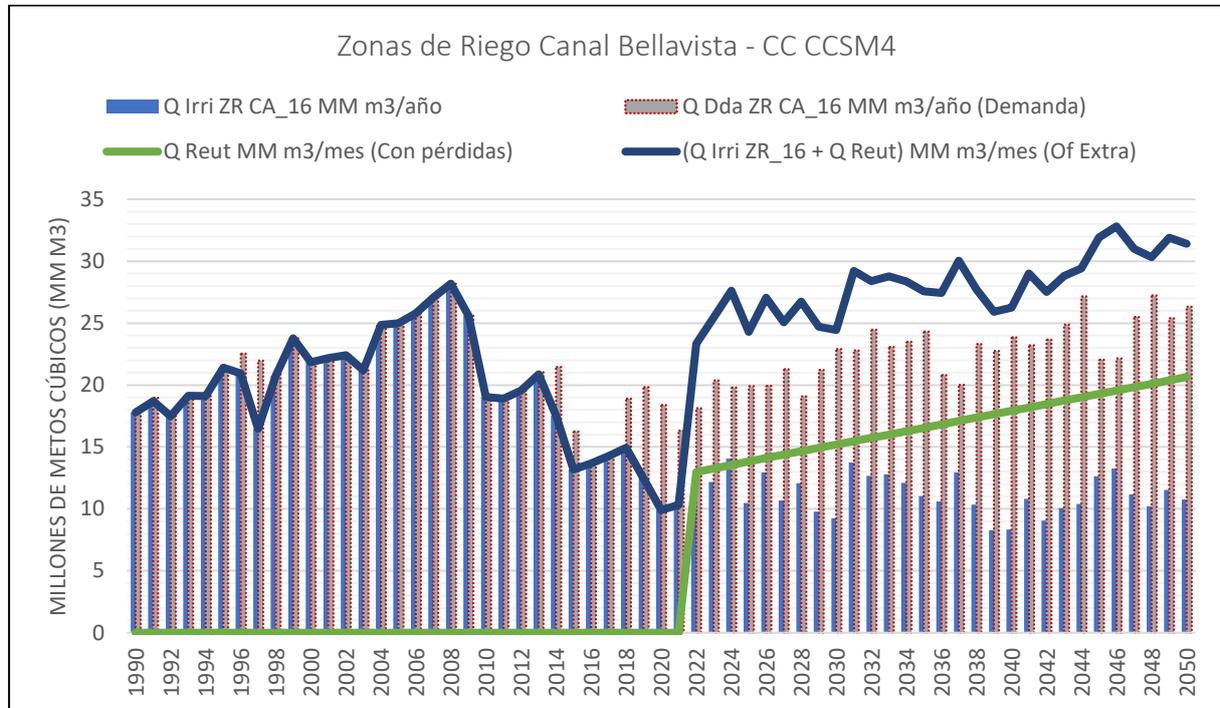


Figura 4-22. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CCSM4, considerando: oferta de riego, caudal de reúso, caudal de demanda y oferta extra.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura siguiente se observa que la demanda es satisfecha en un 100% con la nueva oferta generando un excedente de entre 2,67 y 9,58 hectómetros cúbicos al año que podrá ser aprovechado por los acuíferos vinculados a estas zonas de riego. Este excedente es mayor en cantidad de volumen y con una menor variabilidad respecto a escenario CSIRO.

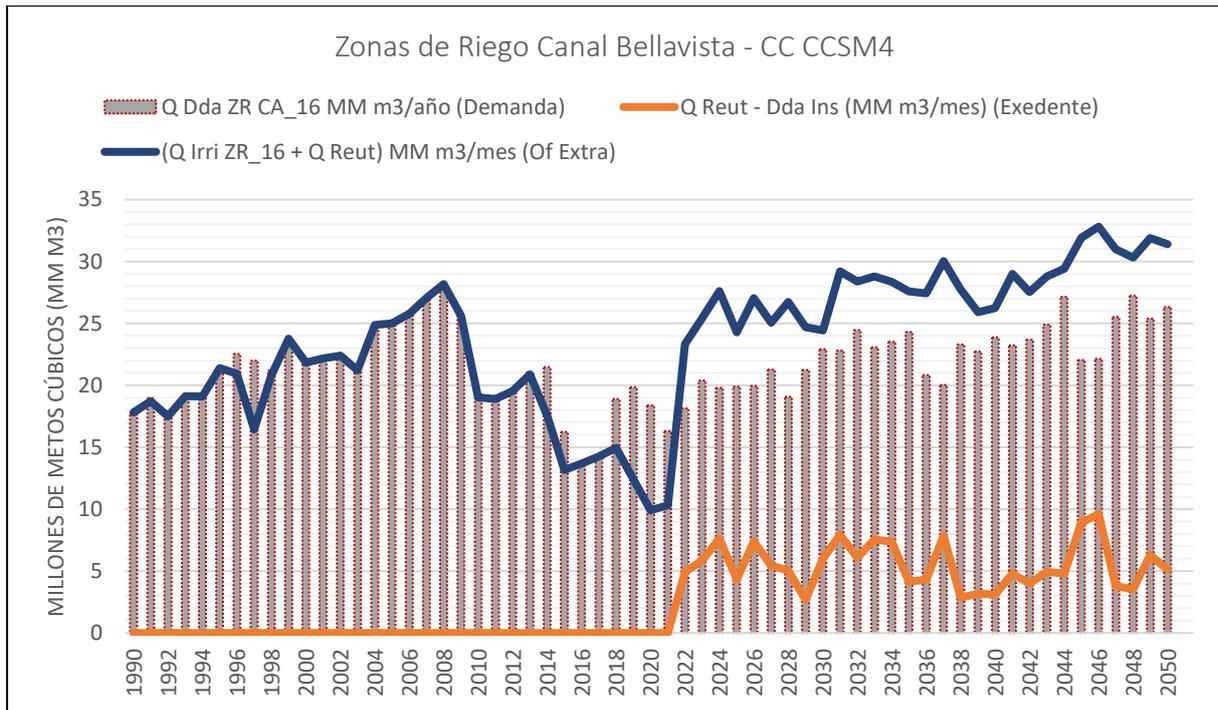


Figura 4-23. Gráfica de las zonas de riego del canal Bellavista con MCG CCSM4, considerando: caudal de demanda, excedente, y oferta extra.

Fuente: Elaboración propia en base datos extraídos del Modelo WEAP.

En el siguiente subcapítulo se realizará un análisis de los resultados. Los resultados presentados, serán de insumo para el desarrollo de los cálculos realizados en el análisis hidroeconómico del siguiente capítulo, además se incorpora el análisis de estos.

#### 4.6 ANALISIS HIDROECONÓMICO

Para estimar los costes de inversión en la reutilización de plantas de aguas residuales se deben tomar en cuenta los tratamientos para lograr la calidad de aguas adecuada y el sistema de conducción que llevará el agua a las zonas de demanda asignadas. Para ello el presente apartado realiza un repaso por sistema de tratamiento y conducción, evaluando alternativas, incluyendo los datos de demanda calculados anteriormente que permitan conjugar los costes y beneficios con los que se evaluará la solución propuesta en el presente trabajo de prefactibilidad.

#### 4.6.1 Tratamiento de aguas residuales

##### Características de los proyectos de reutilización

El proyecto de reutilización de aguas residuales constituye una serie de elementos para su entrega final a los sectores agrícolas demandados. Para ello se necesitará de instalaciones para recolectar y conducir las aguas. En primer lugar, se conducen las aguas pretratadas desde la antigua planta de tratamiento perteneciente al emisario submarino existente hasta la nueva PTAS, donde se tratarán las aguas de acuerdo con las calidades estipuladas para su uso; inicialmente en el uso de riego agrícola e indirectamente a las aguas subterráneas, que ayudan a mitigar el déficit en agua potable y minería en menor proporción. Luego estas aguas se elevarán y se conducirán hacia estanques de acumulación y plantas elevadoras, según correspondan.

Se proponen tres diseños de tratamientos de aguas servidas de calidad de aguas: Lodos o fangos activados (LA en adelante), Reactores Biológicos de Membrana (MBR en adelante) y Humedales artificiales o construidos (HC). Se realiza un análisis comparativo con el fin de optar por un tratamiento coste-efectivo desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Este análisis será un input importante para estimar los costes de inversión.

##### Calidad ES La Serena

El emisario submarino de La Serena, según (Godoy Bravo, 2021) supera los límites para los aceites y grasas (AyG), sólidos suspendidos totales (SST) y SAAM (sustancias activas al azul de metileno). El emisario submarino no cuenta con tratamiento secundario, por lo que este es indispensable para ser incluido, incluso pudiendo llegar a tratamientos terciario. En el Anexo 2., encuentra la tabla con el detalle de la calidad del ES.

Es de suma importancia determinar los parámetros que se requieren en la calidad de acuerdo con cada uso. Seguidamente se describe la calidad solicitada por cada uno de los usos a los que podría utilizarse el reúso de aguas servidas. Se hace referencia a la norma NCh. 1333 que contiene los parámetros requeridos.

### Calidad de aguas para reutilización

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en el año 2006 instauró las directrices principales sobre el nivel de tratamientos enfocados en restricción de cultivos exposición humana y métodos de aplicación. En lo que respecta a la calidad parasitológica y microbiológica, de aguas residuales para uso agrícola, la OMS determinó tres categorías de cultivo que se requiera regar:

- Riego de cultivos consumidos crudos, campos deportivos o parques públicos.
- Riego de cereales, cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles.
- Riego local de cultivos en la categoría anterior si no se expone a trabajadores y/o público.

Los aspectos más relevantes para ser considerados en aplicar el reúso de aguas servidas sobre cultivos: consumo de agua, presencia de tóxicos, asimilación de nutrientes, concertación de sodio y sales solubles. Estos últimos los parámetros son los más relevantes para decidir la inclusión del reúso, variando por cada tipo de cultivo teniendo incidencia en las relaciones de absorción por cómo se compone el suelo. El cloro causa daño cuando sus concentraciones son más elevadas que 5 mg/l, siendo usualmente una concentración de 1 mg/l la que afecta a las plantas cultivadas. (Medeiros, et al, 2005). En la Tabla 4-14 se dan ejemplos de cultivos por cada tipo de cultivo.

*Tabla 4-14. Cultivos agrícolas que utilizan aguas residuales sin tratar o tratadas parcialmente.*

<b>Tipos</b>	<b>Ejemplos de cultivos</b>
Cultivos agrícolas	Cebada, maíz (maíz verde), avena, trigo
Cultivos de fibras y semillas	Algodón, semillas de flores y hortalizas
Hortalizas que pueden consumirse crudas	Brócoli, repollo, coliflor, apio, ají, tomate verde, lechuga, pimiento, tomate
Hortalizas que se procesan antes del consumo	Alcachofa, frijol, cebolla, maní, papa, espinaca, zapallo, remolacha, girasol
Cultivos para forraje	Alfalfa, cebada, trébol, mijo, heno, maíz, pasto
Huertos y viñedos	Árboles frutales, manzanos, paltos, cítricos, limoneros, duraznos, pistachos, ciruelos, olivos, dátiles, vides

Fuente: (FAO, 2013).

En la actualidad existen normativas recientemente aprobadas referidas al reúso de aguas residuales para el uso agrícola: NCh 3483/2021 - Directrices para la clasificación del grado de

calidad para el reúso de agua NCh 3682/2021 - Directrices para la evaluación y gestión de riesgos para la salud en el reúso de aguas servidas tratadas, NCh 3456/2021 - Directrices para el uso de aguas residuales tratadas para proyectos de riego, esta última se obtiene la tabla siguiente donde se muestra la calidad sugerida de aguas residuales tratadas.

*Tabla 4-15. Calidad sugerida de aguas residuales tratadas de acuerdo con parámetros físicos, químicos y biológicos.*

Categoría	Agua generada	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes termotolerantes (nº100/100ml) Max.	Usos potenciales en cultivos agrícolas	Posibles tratamientos
A	Muy alta calidad	10	10	100	Alimenticios consumidos crudos	Secundario, filtración por contacto o membrana y desinfección
B	Alta calidad	20	25	1000	Alimenticios procesados	Secundario, filtración y desinfección
C	Buena calidad	35	50	10000	No alimentarios	Secundario y desinfección
D	Mediana calidad	35	80	10000	Industriales y sembrados	Secundario o clarificación de alta velocidad con coagulación

Fuente: en base a información de NCh 3456/2.

El uso agrícola de acuerdo con los parámetros internacionales se presenta a continuación la Tabla 4-16 con los veinticuatro contaminantes normados y sus límites recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) en comparación con la NCh 1333.

*Tabla 4-16. Límites máximos permitidos para normas de calidad de agua de riego y descargas de submarinos fuera de litoral.*

Contaminante	Unidad	Tabla Nº5 DS90	NCh 1333	Guía Australiana	EPA 1992
Aceites y grasas	mg/L	150	-	-	-
Aluminio	mg/L	10	5	5 - 20	5
Arsénico	mg/L	0,5	0,1	0,1 - 2	0,1
Bario	mg/L	-	4	-	-
Berilio	mg/L	-	0,1	-	-
Boro	mg/L	-	0,75	0,5	0,75
Cadmio	mg/L	0,5	0,01	-	0,01
Cianuro	mg/L	1	0,2	-	-
Cloruro	mg/L	-	200	-	-

Contaminante	Unidad	Tabla N°5 DS90	NCh 1333	Guía Australiana	EPA 1992
Cobre	mg/L	3	0,2	0,2 - 5	0,2
Cobalto	mg/L	-	0,05	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 ml	-	1000	-	-
Índice de fenol	mg/L	1	-	-	-
Cromo hexavalente	mg/L	0,5	0,1	-	0,1 - 1
Cromo total	mg/L	10	-	-	-
DBO5	mgO2/L	-	-	600	< 10
Fluoruro	mg/L	6	1	1 - 20	1
Fósforo	mg/L	-	-	0,05 - 12	-
Hierro disuelto	mg/L	-	5	-	5
Litio	mg/L	-	2,5	-	-
Manganeso	mg/L	4	0,2	-	0,2
Mercurio	mg/L	0,02	0,001	0,002	-
Molibdeno	mg/L	0,5	0,01	0,01 - 0,05	0,01
Niquel	mg/L	4	0,2	-	0,2
Nitrogeno total Kjeldahl	mg/L	-	-	5 - 125	-
PH	Unidad	5,5 - 9	5,5 - 9	-	-
Plata	mg/L	-	0,2	-	-
Plomo	mg/L	1	5	-	5
Selenio	mg/L	0,03	0,02	-	0,02
SST	mg/L	300	-	-	-
Sulfuros	mg/L	5	-	-	-
Zinc	mg/L	5	2	-	2
Sulfatos	mg/L	-	250	-	-
Solidos suspendidos totales	mg/L	-	-	-	500 - 2000
Vanadio	mg/L	-	0,1	-	-

Fuente: Decreto supremo N°90 y (Fundación Chile, 2018).

Si se compara la norma chilena NCh 1333 con las normas internacionales, la primera establece límites de concentración iguales o menores para la totalidad de contaminantes que la segunda. Cuando se trata de aguas descargadas por emisarios submarinos, como es el caso de la oferta propuesta, estas deben ser tratadas para eliminar contaminantes según la norma NCH 1333. A pesar de ello es importante destacar que estos emisarios se controlan de acuerdo con la norma de agua potable, correspondiente a la NCh 409, siendo estos valores mayores que la normativa de riego.

Según (Godoy Bravo, 2021) en el sector del ES de la Serena la técnica que se utilizará para la remoción de contaminantes, que permitan el uso del agua en el sector agrícola, son los tratamientos primarios, secundarios e incluso terciarios en el caso de cultivos. Estos

tratamientos pueden corresponder a tratamientos secundarios a través de lodos activados, sistemas MBR o humedales construidos en complemento a tratamientos terciarios de filtración y esterilización, con el que se puede obtener el estándar requerido para aguas de calidad. Estos procesos de reutilización se diferencian de la desalación de agua de mar, ya que esta requiere un proceso de pretratamiento, que puede ser filtración de lecho, filtración de cartucho o adsorción, luego la etapa final del proceso de ósmosis inversa y desinfección.

La calidad de agua tiene sus mejores características cuando se realizan tratamientos terciarios, sin embargo, sus costes son muy elevados y se requiere un estudio específico, dependiendo de su uso y el contacto directo que existe con el humano (FAO, 2013). Es por lo anterior que se hace necesario prescindir de una planta de tratamiento secundario para los usos de agua que se pretenden destinar principalmente al riego en el presente trabajo.

#### 4.6.2 Sistema de conducciones, plantas elevadoras y estanques proyectadas

##### *Esquema de sistema de conducción N°1*

En la Figura 4-24. Trazada y emplazamiento del sistema de conducción N°1. se presenta el sistema de conducción N°1, que contempla la utilización de terrenos aledaños a la actual planta de pretratamiento del Emisario Submarino (ES) de La Serena. Esta planta será modificada y adaptada para ser utilizada como Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS), que permita impulsar con bombas elevadoras el agua tratada y reutilizada hacia el canal Bellavista, y así aumentar su oferta.

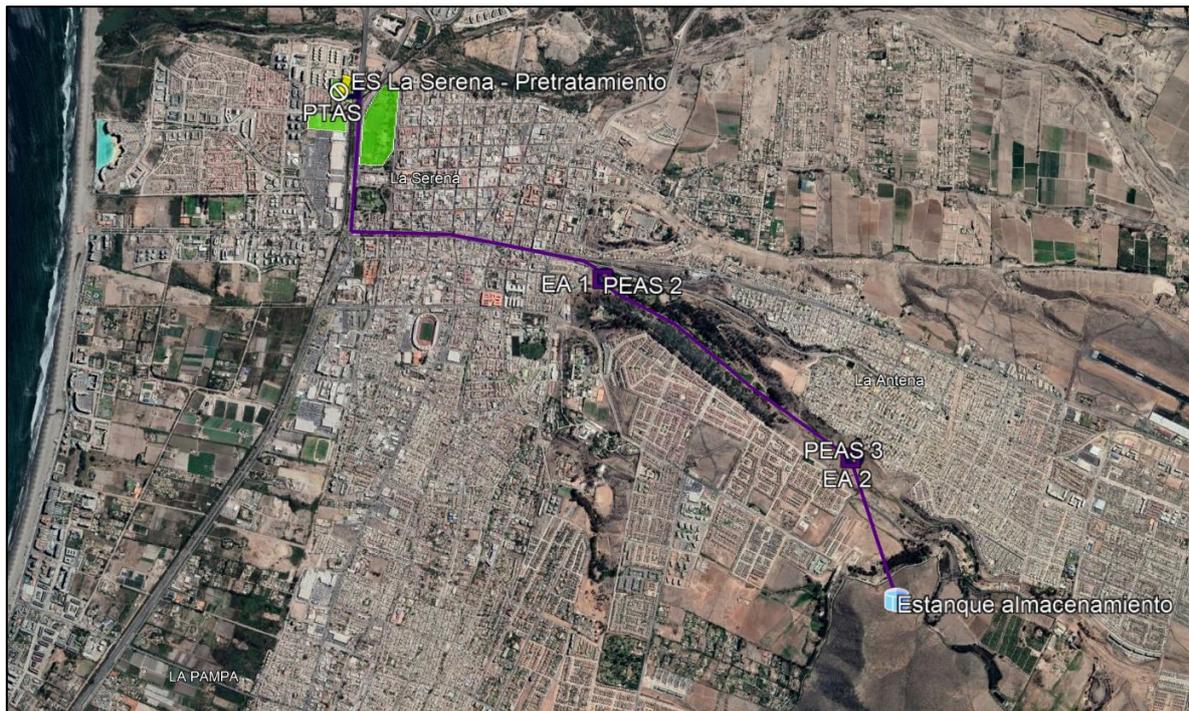


Figura 4-24. Trazada y emplazamiento del sistema de conducción N°1.

Fuente: Elaboración propia.

Los elementos e instalaciones considerados para este sistema son los siguientes:

- Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas (PTAS) con lodos activados o membranas.
- Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS) que incluyen Estanque de succión con bombas.
- Conducciones a presión en tuberías cilíndricas.
- Estanques de almacenamiento o acumulación.
- Canal de conducción a derivación con el canal Bellavista.

En la Figura 4-25 se presenta el perfil aproximado de las conducciones, con sus respectivas instalaciones, además del nivel piezométrico al que estarán sometidas las conducciones. Se considera para la ubicación de las plantas elevadoras las elevaciones de terreno en concordancia con la cantidad de pérdidas, la posibilidad de almacenar el agua en estanques de succión, para ello se calcularon las presiones.

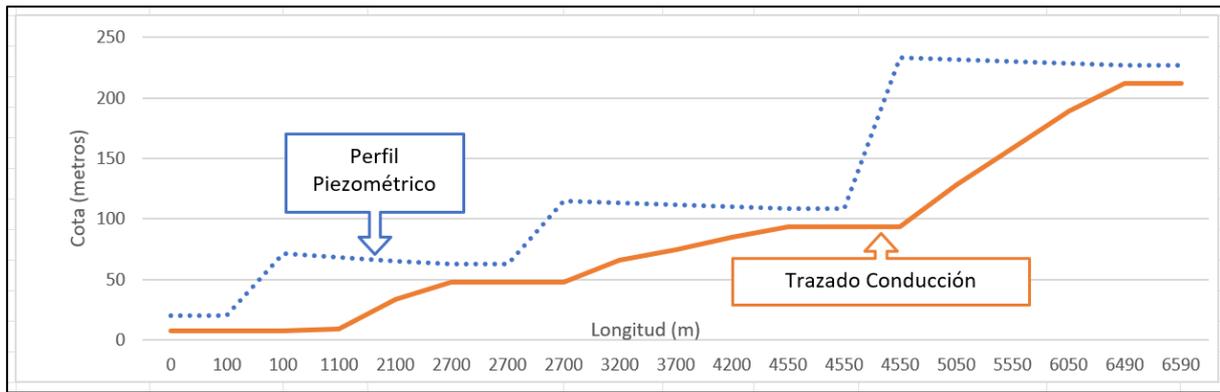


Figura 4-25. Esquema de perfil de solución de conducción N°1.

Fuente: Elaboración propia.

### Esquema de sistema de conducción N°2

En la siguiente figura se presenta el sistema de conducción N°2, que contempla la utilización de terreno aledaños a la actual planta de pretratamiento del Emisario Submarino (ES) de La Serena. Al igual que el sistema anterior, esta planta será modificada y adaptada para ser utilizada como Planta de Tratamiento De Aguas Servidas (PTAS), que permita impulsar el agua tratada y reutilizada a través de las conducciones.

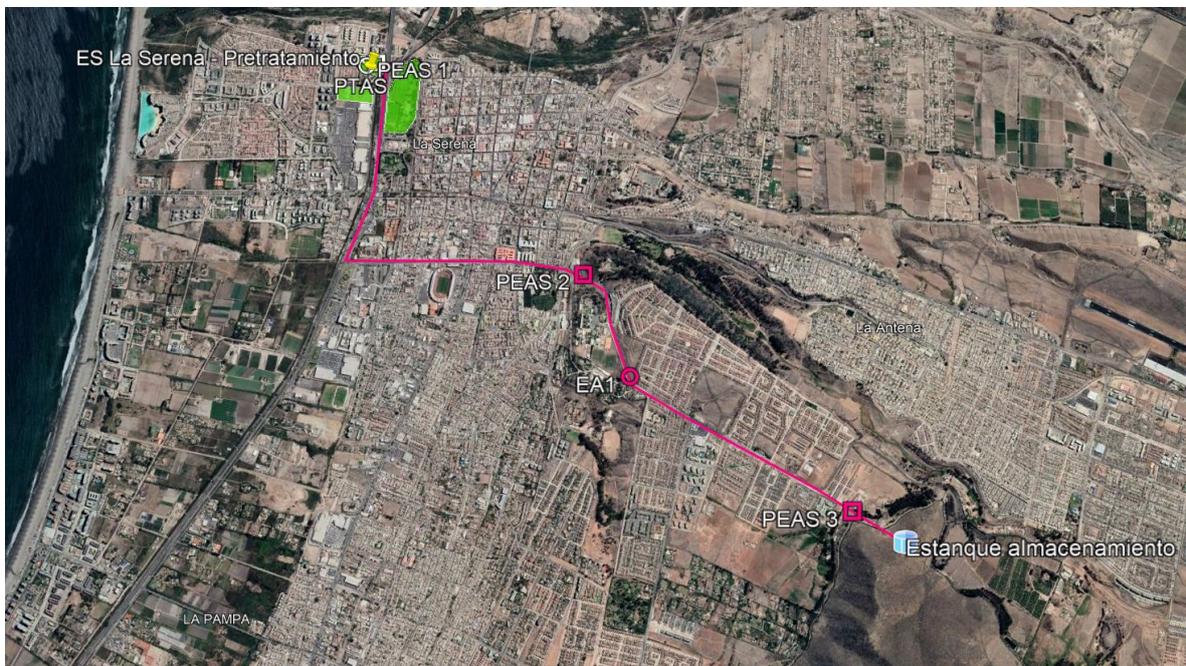


Figura 4-26. Trazada y emplazamiento del sistema de conducción N°2.

Fuente: Elaboración propia.

L

os elementos e instalaciones considerados para este sistema son los siguientes:

- Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas (PTAS) con lodos activados o membranas
- Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS) que incluyen Estanque de succión con bombas
- Conducciones a presión en tuberías cilíndricas
- Estanques de almacenamiento o acumulación.
- Canal de conducción a derivación con el canal Bellavista

En la Figura 4-27 se presenta el perfil aproximado de las conducciones, con sus respectivas instalaciones, además del nivel piezométrico al que estarán sometidas las conducciones. A diferencia del Sistema anterior, este contempla solo un estanque de acumulación debido a las condiciones de terreno.

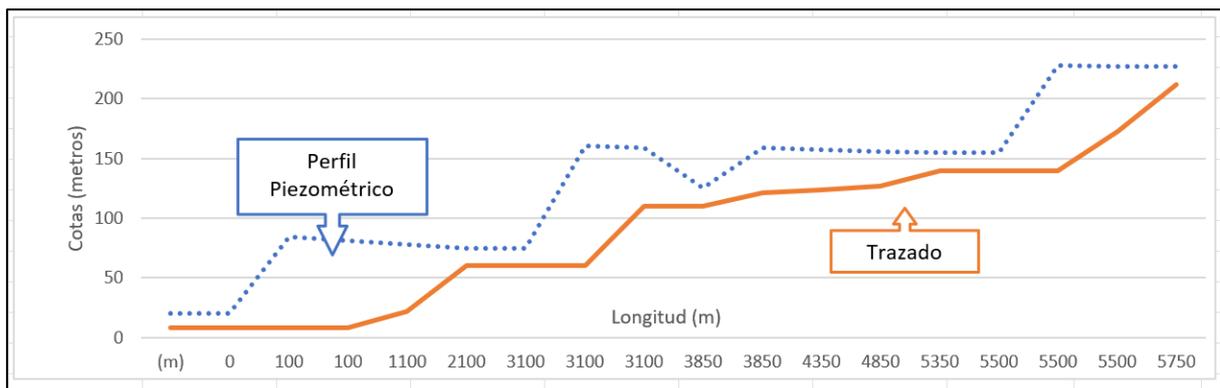


Figura 4-27. Esquema de perfil de solución de conducción N°2.

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca que el trazado expuesto en los dos sistemas se sitúa en lugares donde es conveniente expropiar terrenos, debido a su coste menor (sin edificación), sobre todo para el caso de plantas elevadoras y estanques de acumulación. En el caso de conducciones se privilegiaron caminos anchos para poder realizar faenas de construcción de tuberías enterradas y que permitieran permisos municipales más ágiles. Lo anterior tiene como objetivo optimizar los trazados tomando en cuenta las zonas de riego que serán beneficiadas, considerando la altura que necesitan para ser descargadas al canal Bellavista.

### Caudal de diseño

Se considera el caudal mayor de registro hasta 2050. De acuerdo con lo descrito en el acápite 4.3.1 el caudal utilizado como diseño es de 770 l/s, ya que es el máximo disponible en los 30 años de horizonte futuro que está considerada la operación del sistema.

### Presión máxima de diseño

El cálculo de las presiones se presenta en los Anexo 4 y Anexo 5. Las presiones calculadas permiten hacer una definición más específica de las estaciones elevadoras de bombeo, además de emplear tuberías de mayor capacidad que la presión de diseño en cada tramo, minimizando y optimizando los costes del sistema (Godoy Bravo, 2021).

### Planta de tratamiento de aguas servidas y requerimientos de calidad

Para lograr los objetivos de calidad, se considerarán los procesos existentes de pretratamiento y tratamiento primario del emisario submarino, añadiendo otro pretratamiento y tratamiento primario en cada sistema.

Seguido de los tratamientos secundarios descritos en apartados anteriores, se incluye un tratamiento terciario con el propósito de obtener la calidad requerida, considerando el riego principal e indirectamente el aporte a aguas subterráneas, muchas de ellas utilizadas en consumo de agua potable. Para el presente estudio no se considera como alcance del mismo el diseño detallado de las plantas de tratamiento en las alternativas consideradas. En la Tabla 4-17 se muestran los procesos de tratamiento de las alternativas indicadas.

*Tabla 4-17. Procesos de tratamiento en PTAS para cada sistema proyectado.*

<b>Proceso de tratamiento</b>	<b>Sistema Lodos Activados</b>	<b>Sistema MBR</b>	<b>Sistema Humedal Construido</b>
Pretratamiento	Desarenado y desgrasado	Desarenado y desgrasado	Desarenado y desgrasado
Primario	Floculación/ Coagulación Decantador primario	MBR	Floculación/ Coagulación Decantador primario

Proceso de tratamiento	Sistema Lodos Activados	Sistema MBR	Sistema Humedal Construido
Secundario	Lodos activados Clarificador		Humedal construido
Terciario	Filtración/ Intercambio iónico Desinfección	Filtración/ Intercambio iónico Desinfección	Filtración/ Intercambio iónico Desinfección

Fuente. Tabla 36 de (Godoy Bravo, 2021).

De acuerdo con el alcance de los sistemas propuestos en el presente trabajo, no se ha considerado el diseño específico de los lodos activados. De todas formas, es importante señalar que los lodos deberán considerar lo que establece el Decreto Supremo 04 sobre la clasificación, manejo y la posterior disposición de lodos tratados (Godoy Bravo, 2021). No se considerará para la estimación de costes de los sistemas los humedales construidos ya que se demuestra con la Ecuación 10 la inviabilidad de la construcción de humedales artificiales ya que el coste de su mantenimiento es del orden de 14.000 veces las otras alternativas.

A partir de los esquemas presentados en el acápite 4.6.2 se estimaron las elevaciones para la operación de las bombas en cada tramo de conducción. Los sistemas de impulsión opera con unas bombas en operación (n) más una de respaldo en caso de fallas (n +1 bombas).

Tabla 4-18. Potencia Instalada Plantas elevadoras sistema 1.

Planta elevadora	Tramo de impulsión	Longitud	Altura de operación	Número de bombas	Caudal Proy	Caudal x bomba			Potencia bomba	Potencia instalada
		(m)	(m)	(n+1)	(L/s)	(L/s)	(L/min)	(m <sup>3</sup> /hr)	(kW)	(kW)
PEAS 1	1	100	63	3	770	385	11.550	693	45	135
PE2	2	2.600	46	3	770	385	11.550	693	90	270
PE3	3	1.850	118	3	770	385	11.550	693	90	270

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-19. Potencia Instalada Plantas elevadoras sistema 2.

Planta elevadora	Tramo de impulsión	Longitud	Altura de operación	Número de bombas	Caudal Proy	Caudal x bomba			Potencia bomba	Potencia instalada
		(m)	(m)	(n+1)	(L/s)	(L/s)	(L/min)	(m³/hr)	(kW)	(kW)
PEAS 1	1	100	100	8	770	385	11.550	693	45	135
PE2	2	2.600	3.000	52	770	385	11.550	693	90	270
PE3	3	1.850	2.400	80	770	385	11.550	693	90	270

Fuente: Elaboración propia.

### Estanques de succión y almacenamiento y área requerida PTAS

Cada planta elevadora está conformada por un estanque de succión con bombas. En las PTAS se proyecta la construcción de dos estanques, uno para el afluente y otro para el efluente, de aguas servidas y aguas tratadas respectivamente. Se han contemplado 3 estanques para la solución del Sistema 1, dos a lo largo del trazado y uno al final de la impulsión. Para el Sistema 2 se contempla solo uno a largo del trazado de conducción y el mismo estanque al finalizar la impulsión. En la Tabla 4-20. se presentan los resultados que determinan el volumen de almacenamiento de los estanques para los sistemas, siendo estos iguales en dimensiones.

Tabla 4-20. Estanques de succión y almacenamiento sistema La Serena.

Estanques	Caudal (m³/hr)	Tiempo Almacenamiento máximo (horas)	Estanque Almacenamiento (m³)
EA1	2.079	10	20.790
EA2	2.079	10	20.790
EA3	2.079	10	20.790

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los cálculos realizados se estiman las áreas a utilizar por las diferentes tipologías de tratamientos.

Tabla 4-21. Áreas requeridas PTAS Sistema La Serena.

Sistema La Serena	Área PTAS (m²)
Lodos activados	79.740,0
MBR	23.922,0
Humedal Construido	13.954.495,4

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el área de humedales es muy grande no se considera dentro del cálculo final, ya que su valor es muy costoso respecto a las otras alternativas, además de estar condicionado a sectores cercanos con un espacio suficiente para su implementación, que por problemas ambientales podría entorpecer su implementación. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Anexo 3. se presenta el cálculo de los costes realizado de acuerdo con cada sistema. Además, en el Anexo 4. y Anexo 5. se presentan los cálculos cuantitativos físicos de los sistemas.

Costes de los sistemas de reúso La Serena: Sistema N°1 y Sistema N°2

En la Tabla 4-22. se presentan los costes para las soluciones de reúso y tratamiento de la solución del sistema N°1 y en Tabla 4-23 la del sistema N°2.

Tabla 4-22. Costes Sistema 1 de reúso La Serena.

Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS ES LA SERENA				
Ítem	Descripción	Ud	Cantidad	Precio unitario	Precio Total Lodos Activados	Precio Total MBR
<b>A</b>	<b>CONDUCCION Y ELEVACION</b>				<b>€ 41.946.805,61</b>	<b>€ 41.946.805,61</b>
<b>1</b>	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>					
1,1	Excavaciones	m3	518.310	€ 6,59	€ 3.413.752,20	€ 3.413.752,20
1,4	Relleno material de excavación	m3	362.817	€ 12,74	€ 4.620.759,40	€ 4.620.759,40
1,5	Relleno material empréstito	m3	155.493	€ 17,58	€ 2.733.075,00	€ 2.733.075,00
1,6	Retiro de excedentes	m3	103.662	€ 14,95	€ 1.549.582,71	€ 1.549.582,71
<b>2</b>	<b>OOCC [Estanques Succión]</b>					
2,1	Hormigón G25	m3	178	€ 145,79	€ 25.972,53	€ 25.972,53
2,2	Emplantillado	m3	15	€ 88,23	€ 1.281,05	€ 1.281,05
2,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	32370	€ 1,51	€ 48.724,87	€ 48.724,87
2,4	Moldajes	m2	2831	€ 36,98	€ 104.674,89	€ 104.674,89
2,5	Moldajes Lisos	m2	814	€ 20,47	€ 16.674,96	€ 16.674,96
<b>3</b>	<b>SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE TUBERIAS</b>					
3,1	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 30"	ml	6590	€ 427,36	€ 2.816.323,21	€ 2.816.323,21
3,2	Rotura y Reposición de Calzada de Hormigón	m2	9100	€ 156,57	€ 1.424.763,69	€ 1.424.763,69
<b>4</b>	<b>TERRENO Y EXPROPIACIONES</b>					
4,1	Uso de suelo Conducción / PEAS / Estanques Succión	m2	17330	€ 1.407,03	€ 24.384.167,45	€ 24.384.167,45
<b>4</b>	<b>EQUIPOS</b>					
4,1	Bomba PE 200 - 300 KW	un	6	€ 54.662,97	€ 327.977,82	€ 327.977,82
4,2	Bomba PEAS 135 KW	un	3	€ 12.791,85	€ 38.375,55	€ 38.375,55

Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS ES LA SERENA				
Ítem	Descripción	Ud	Cantidad	Precio unitario	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR
4,3	Otros Equipos y Piezas Especiales	gl	1	€ 440.700,28	€ 440.700,28	€ 440.700,28
<b>B</b>	<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS</b>				<b>€ 8.489.617,22</b>	<b>€ 23.756.026,85</b>
<b>1</b>	<b>PTAS Humedal Construido</b>					
1,1	Tratamiento LA/ MBR	un	-	-	€ 7.990.109,24	€ 23.606.174,46
1,2	Uso de suelo PTAS LA	m2	79.740	€ 6,26	€ 499.507,98	
1,3	Uso de suelo PTAS MBR	m2	23.922	€ 6,26		€ 149.852,39
<b>C</b>	<b>OBRAS COMPLEMENTARIAS</b>				<b>€ 8.067.506,74</b>	<b>€ 8.067.506,74</b>
<b>1</b>	<b>OOC [Estanques Almacenamiento]</b>					
1,1	Hormigón G25	m3	1794	€ 145,79	€ 261.595,74	€ 261.595,74
1,2	Emplantillado	m3	856	€ 88,23	€ 75.484,31	€ 75.484,31
1,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	325150	€ 1,51	€ 489.436,80	€ 489.436,80
1,4	Moldajes	m2	28510	€ 36,98	€ 1.054.286,99	€ 1.054.286,99
1,5	Moldajes Lisos	m2	8203	€ 20,47	€ 167.950,40	€ 167.950,40
<b>2</b>	<b>TERRENO Y EXPROPIACIONES</b>					
2,1	Uso de suelo Estanques Almacenamiento	m2	4278	€ 1.407,03	€ 6.018.752,51	€ 6.018.752,51
	<b>COSTE DIRECTO</b>	<b>950</b>	<b>Euro</b>		<b>€ 58.503.929,57</b>	<b>€ 73.770.339,20</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-23. Costes Sistema 2 de reúso La Serena.

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS ES LA SERENA				
Ítem	Descripción	Ud	Cantidad	Precio unitario	Precio Total	Precio Total
					Lodos Activados	MBR
<b>A</b>	<b>CONDUCCION Y ELEVACION</b>				€ 38.120.783,75	€ 38.120.783,75
<b>1</b>	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>					
1,1	Excavaciones	m3	518.310	€ 6,59	€ 3.413.752,20	€ 3.413.752,20
1,4	Relleno material de excavación	m3	362.817	€ 12,74	€ 4.620.759,40	€ 4.620.759,40
1,5	Relleno material empréstito	m3	155.493	€ 17,58	€ 2.733.075,00	€ 2.733.075,00
1,6	Retiro de excedentes	m3	103.662	€ 14,95	€ 1.549.582,71	€ 1.549.582,71
<b>2</b>	<b>OOC [Estanques Succión]</b>					
2,1	Hormigón G25	m3	178	€ 145,79	€ 25.972,53	€ 25.972,53
2,2	Emplantillado	m3	15	€ 88,23	€ 1.281,05	€ 1.281,05
2,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	32370	€ 1,51	€ 48.724,87	€ 48.724,87
2,4	Moldajes	m2	2831	€ 36,98	€ 104.674,89	€ 104.674,89
2,5	Moldajes Lisos	m2	814	€ 20,47	€ 16.674,96	€ 16.674,96

Formato de Presupuesto Anteproyecto		SISTEMA REUSO DE AGUAS SERVIDAS ES LA SERENA				
Ítem	Descripción	Ud	Cantidad	Precio unitario	Precio Total Lodos Activados	Precio Total MBR
<b>3</b>	<b>SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE TUBERIAS</b>					
3,1	Cañería Acero ASTM A53 Gr B revestida en HDPE 30"	ml	5850	€ 427,36	€ 2.500.074,47	€ 2.500.074,47
3,2	Rotura y Reposición de Calzada de Hormigón	m2	11000	€ 156,57	€ 1.722.241,83	€ 1.722.241,83
<b>4</b>	<b>TERRENO Y EXPROPIACIONES</b>					
4,1	Uso de suelo Conducción / PEAS / Estanques Succión	m2	14624	€ 1.407,03	€ 20.576.916,19	€ 20.576.916,19
<b>4</b>	<b>EQUIPOS</b>					
4,1	Bomba PE 200 - 300 KW	un	6	€ 54.662,97	€ 327.977,82	€ 327.977,82
4,2	Bomba PEAS 40 KW	un	3	€ 12.791,85	€ 38.375,55	€ 38.375,55
4,3	Otros Equipos y Piezas Especiales	gl	1	€ 440.700,28	€ 440.700,28	€ 440.700,28
<b>B</b>	<b>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS</b>				€ 8.489.617,22	€ 23.756.026,85
<b>1</b>	<b>PTAS Humedal Construido</b>					€ 23.606.174,46
1,1	Tratamiento LA/ MBR	un	-	-	€ 7.990.109,24	€ 23.606.174,46
1,2	Uso de suelo PTAS LA	m2	79.740	€ 6,26	€ 499.507,98	
1,3	Uso de suelo PTAS MBR	m2	23.922	€ 6,26		€ 149.852,39
<b>C</b>	<b>OBRAS COMPLEMENTARIAS</b>				€ 5.378.337,83	€ 5.378.337,83
<b>1</b>	<b>OCC [Estanques Almacenamiento]</b>					
1,1	Hormigón G25	m3	1196	€ 145,79	€ 174.397,16	€ 174.397,16
1,2	Emplantillado	m3	570	€ 88,23	€ 50.322,87	€ 50.322,87
1,3	Enfierradura acero A63-42H	kg	216767	€ 1,51	€ 326.291,20	€ 326.291,20
1,4	Moldajes	m2	19007	€ 36,98	€ 702.857,99	€ 702.857,99
1,5	Moldajes Lisos	m2	5469	€ 20,47	€ 111.966,93	€ 111.966,93
<b>2</b>	<b>TERRENO Y EXPROPIACIONES</b>					
2,1	Uso de suelo Estanques Almacenamiento	m2	2852	€ 1.407,03	€ 4.012.501,68	€ 4.012.501,68
<b>COSTE DIRECTO</b>		<b>950</b>	<b>Euro</b>		<b>€ 51.988.738,79</b>	<b>€ 67.255.148,43</b>

Fuente: Elaboración propia.

En el presupuesto general del presente trabajo no se incluyen gastos generales, imprevistos y utilidades o beneficios, solo costes directos. Los precios unitarios se indican en el Anexo 6. Se considera un cambio monetario al 10 de agosto de 2023 de 1 euro = \$950 pesos chilenos.

De los resultados se desprende que el Sistema 2 es más económico debido a la menor cantidad de equipamiento y conducciones. Sin embargo, no se puede descartar ninguno, ya que dependen de las condiciones de permisos ambientales y otros factores externos que permitan discernir entre los dos sistemas.

#### 4.6.3 Estimación agroeconómica

En el siguiente subcapítulo se hará un análisis de los beneficios que se pierden cuando no se satisface la demanda de riego, para ello se utilizarán los datos calculados en el acápite 4.5.3 referidos a los déficits de demanda.

##### *Datos para la estimación agroeconómica*

Se han utilizado fichas técnico-económicas elaboradas por el Ministerio de Agricultura de Chile (MINAGRI), a través de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), de los diferentes cultivos de las zonas de riego ZR COS 03 y ZR ELQUI 08, para estimar el beneficio que se pierde por no satisfacer las demandas de riego. Algunos de los datos incluidos en la estimación de producción de cultivos son su variedad, tecnología de riego destino de producción, densidad (plantas/ha) y fecha de cosecha.

A continuación se muestra una ficha de ejemplo donde se extraen datos de costes, margen neto por hectárea, precios por unidades de cultivo y hectáreas de estos. Este margen neto corresponde al promedio del rendimiento de unidades de cultivo por hectárea.

ODEPA Ministerio de Agricultura  Gobierno de Chile		Ficha Técnico Económica Apio Región de Coquimbo			
<b>Parámetros generales A</b>					
1 hectárea agosto 2018 Tecnología de riego: Riego por surco Densidad (plantas/hectárea)(0,7m x 0,3 m): 42.000 Fecha de plantación: febrero			Variedad: Balada, Congo. Destino de producción: Consumo fresco Tecnología: Meda Fecha de cosecha: mayo		
<b>Parámetros generales B</b>					
Rendimiento (unidades/hectárea):	32.000				
Precio de venta a productor (\$/unidad) <sup>(1)</sup> :	\$200				
Costo jornada hombre (\$/jornada hombre)	\$16.000				
Tasa interés mensual (%):	1,50%				
Meses de financiamiento:	4				
<b>Resumen contable:</b>					
Ingreso por hectárea (f)	\$6.400,000				
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$3.254,475				
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$3.352,109				
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$3.145,525				
Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))	\$3.047,891				
Costo unitario	\$105				
<b>Costos directos</b>					
<b>Mano de obra (a)</b>					
	Periodo	Cantidad	Unidad	Precio (\$/unidad)	Valor (\$)
Riego	febrero - mayo	12,0	jornada hombre	16,000	192,000
Trasplante	febrero	42,000,0	unidad	3	128,000
Limpia manual yazadón	febrero - marzo	20,0	jornada hombre	16,000	320,000
Aplicación fertilizantes	febrero - marzo	3,0	jornada hombre	16,000	48,000
Aplicación agroquímicos	febrero - abril	3,0	jornada hombre	16,000	48,000
Acarreo de insumos y cosecha	febrero - mayo	2,0	jornada hombre	16,000	32,000
Cosecha <sup>(2)</sup>	mayo	32,000,0	unidad	40	1,280,000
<b>Total mano de obra</b>					<b>2,046,000</b>
<b>Maquinaria (b)<sup>(3)</sup></b>					
	Periodo	Cantidad	Unidad	Precio (\$/unidad)	Valor (\$)
Aradura	enero - febrero	1,0	hectárea	30,000	30,000
Rastraje	enero - febrero	2,0	hectárea	35,000	70,000
Melgadura y aplicación de fertilizantes	febrero - marzo	1,0	hectárea	30,000	30,000
Acequadora	febrero - marzo	2,0	hectárea	6,000	12,000
Aplicaciones de pesticidas	febrero - abril	2,0	hectárea	15,000	30,000
Cultivación entre hileras y aplicar fertilizantes	febrero - marzo	2,0	hectárea	30,000	60,000
Acarreo de insumos	febrero - mayo	1,0	hectárea	40,000	40,000
Acarreo de cosechas	abril - mayo	32,000,0	hectárea	4	128,000
<b>Total maquinaria</b>					<b>400,000</b>
<b>Insumos (c)<sup>(4)</sup></b>					
	Periodo	Cantidad	Unidad	Precio (\$/unidad)	Valor (\$)
Plántula	enero-febrero	0,0	unidad	16	0
<b>Fertilizantes:</b>					
Mezcla hortícola incorporada 17 20 20	febrero	200,0	kib	343	68,600
Urea	febrero - marzo	300,0	kib	330	99,000
Sulfato potásico	marzo - abril	200,0	kib	350	70,000
<b>Fungicidas:</b>					
Protopol/25 EC	febrero	1,0	litro	38,000	38,000
Comet	marzo - abril	1,0	litro	39,500	39,500
<b>Insecticidas:</b>					
ZERO 5 EC	febrero - abril	1,0	litro	31,000	31,000
Engoo 247 ZC	marzo - abril	0,4	litro	97,200	38,880
<b>Otros</b>					
Terrasorb foliar	febrero - abril	5,0	litro	8,850	44,250
Frutalv	febrero - abril	5,0	litro	15,154	75,770
Break adherente	febrero - abril	1,0	litro	15,500	15,500
Amarra para los atados	abril - mayo	26,0	atados	3,000	78,000
Costo agua	desarrollo del cultivo	1,0	hectárea	30,000	30,000
Análisis de suelo (fertilidad completa) <sup>(5)</sup>	diciembre-enero	1,0	análisis	25,000	25,000
<b>Total insumos</b>					<b>653,500</b>
<b>Imprevistos (d)</b>					
		Cantidad	Unidad		Valor (\$)
Imprevistos		5%	porcentaje		154,975
<b>Total costos directos (a+b+c+d)</b>					<b>3.254,475</b>
<b>Costos indirectos (e)</b>					
	Item	Cantidad	Unidad		Valor (\$)
Costo financiero (tasa de interés) <sup>(6)</sup>		1,5%	porcentaje		97,634
Costo oportunidad (arriendo)					
Administración					
Contribuciones					
<b>Total costos indirectos</b>					<b>97,634</b>
<b>Total costos</b>					<b>3.352,109</b>
<b>Análisis de sensibilidad <sup>(7)</sup></b>					
<b>Margen neto (\$/hectárea)</b>					
	Precio (\$/unidad)	180,0	200	220	
Rendimiento (unidades/hectárea)		28,800	32,000	35,200	
		\$ 1.831.891	\$ 2.407.891	\$ 2.983.891	
		\$ 2.407.891	\$ 3.047.891	\$ 3.687.891	
		\$ 2.983.891	\$ 3.687.891	\$ 4.391.891	
<b>Costo unitario (\$/unidad) <sup>(8)</sup></b>					
Rendimiento (unidades/hectárea)		28,800	32,000	35,200	
Costo unitario (\$/unidad)		\$ 116	\$ 105	\$ 95	
<b>Notas:</b>					
(1) El precio de la planta de apio corresponde al promedio de las entrevistas de la región, a nivel predial (precio pagado a productor) durante el periodo de cosecha en la temporada 2018.					
(2) La cosecha consiste en el cortado y formación de paquetes de 12 plantas de apio, amarrar y cargar camioneta.					
(3) Representa el valor de arriendo en la región.					
(4) El programa fitosanitario y nombre de productos es solo referencial y no constituye recomendación alguna por parte de Odepa. Para cada caso particular, consultar con un profesional calificado de acuerdo a las condiciones específicas de cada predio. El productor puede cambiar los parámetros a través de la ficha de simulación. Las plántulas son producidas en la zona y deben ser enraizadas con 2 o 3 meses de antelación para asegurar la disponibilidad de estas.					
(5) La dosis de fertilización promedio podría variar de acuerdo a los resultados del análisis de suelo.					
(6) 1,5% mensual simple sobre el 50% de los costos directos, tasa de interés promedio de las empresas distribuidoras de insumos.					
(7) Margen neto corresponde a ingresos totales (precio venta x rendimiento) menos los costos totales.					
(8) Representa el precio de venta mínimo para cubrir los costos totales de producción.					

Figura 4-28. Ficha técnico-económica del apio de la región de Coquimbo.

Fuente: (ODEPA - Ministerio de Agricultura, 2022).

Cada una de las fichas anteriormente mencionados, y ejemplificadas en la figura anterior, se resumen a continuación en las siguientes tablas agrupadas por tipo de cultivos.

Tabla 4-24 Resumen de fichas técnico-económicas cítricos.

CITRICOS

<b>Resumen contable: LIMON</b>	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 7,820,000.00
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 5,779,924.50
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 6,275,346.60
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 2,040,075.50
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 1,544,653.40</b>
Costo unitario	\$ 136.42

<b>Resumen contable: ALFALFA</b>	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 2,839,680.00
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 1,755,859.35
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 1,834,873.02
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 1,083,820.65
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 1,004,806.98</b>
Costo unitario	\$ 105.45

<b>Resumen contable: VID VINIFERA</b>	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 1,920,000.00
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 1,091,239.00
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 1,189,450.51
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 828,761.00
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 730,549.49</b>
Costo unitario	\$ 155.50

<b>Resumen contable: OLIVO Tec</b>	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 4,200,000.00
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 2,426,334.75
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 2,634,306.30
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 1,773,665.25
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 1,565,693.70</b>
Costo unitario	\$ 376.33

<b>Resumen contable: KIWI Tec</b>	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 4,717,500.00
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 3,507,241.50

Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 3,807,862.20
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 1,210,258.50
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 909,637.80</b>
Costo unitario	\$ 205.83

Resumen contable: UVA Mesa No Tec	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 16,100,000.00
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 8,306,197.73
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 9,053,755.52
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 7,793,802.28
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 7,046,244.48</b>
Costo unitario	\$ 258.68

Resumen contable: PALTO Tec	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 8,000,000.00
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 4,481,359.05
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 4,884,681.36
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 3,518,640.95
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 3,115,318.64</b>
Costo unitario	\$ 488.47

Fuente: Elaboración propia en base a (ODEPA - Ministerio de Agricultura, 2022).

Tabla 4-25 Resumen de fichas técnico-económicas cereales.

CEREALES

Resumen contable: QUINOA	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 1,500,000
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 720,300
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 761,460
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 779,700
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 738,540</b>
Costo unitario	\$ 508

Resumen contable: MAIZ	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 2,704,000
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 1,370,177
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 2,020,387
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 1,333,824
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 683,613</b>
Costo unitario	\$ 15,541

Resumen contable: TRIGO No Tec	
--------------------------------	--

Ingreso por hectárea (f)	\$ 722,500
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 598,480
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 625,412
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 124,020
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 97,088</b>
Costo unitario	\$ 12,508

Resumen contable: AVENA No Tec	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 541,500
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 503,831
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 534,061
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 37,669
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 7,439</b>
Costo unitario	\$ 9,369

Resumen contable: ARROZ No Tec	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 1,314,892
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 866,492
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 1,283,628
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 448,399
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 31,264</b>
Costo unitario	\$ 18,338

Fuente: Elaboración propia en base a (ODEPA - Ministerio de Agricultura, 2022).

Tabla 4-26 Resumen de fichas técnico-económicas hortalizas.

#### HORTALIZAS

Resumen contable: MAIZ DULCE	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 4,400,000
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 2,813,122
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 2,939,713
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 1,586,878
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 1,460,287</b>
Costo unitario	\$ 73

Resumen contable: LECHUGA ESCAROLA	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 5,600,000
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 3,530,236
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 3,812,654
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 2,069,764
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 1,787,346</b>
Costo unitario	\$ 109

Resumen contable: APIO	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 6,400,000
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 3,254,475
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 3,352,109
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 3,145,525
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 3,047,891</b>
Costo unitario	\$ 105

Resumen contable: HABA	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 2,030,000
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 1,764,630
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 1,830,804
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 265,370
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 199,196</b>
Costo unitario	\$ 6,313

Resumen contable: TOMATE No Tec	
Ingreso por hectárea (e)	\$ 9,000,000
Costos directos por hectárea (a+b+c)	\$ 6,323,930
Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	\$ 6,561,077
Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	\$ 2,676,071
<b>Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))</b>	<b>\$ 2,438,923</b>
Costo unitario (caja 18 kilos)	\$ 2,187

Resumen contable: No Tec	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 12,190,000
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 7,658,748
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 8,348,035
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 4,531,252
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 3,841,965</b>
Costo unitario	\$ 32

Resumen contable: PAPA Tec	
Ingreso por hectárea (f)	\$ 7,200,000
Costos directos por hectárea (a+b+c+d)	\$ 5,762,581
Costos totales por hectárea (a+b+c+d+e)	\$ 5,978,677
Margen bruto por hectárea (f - (a+b+c+d))	\$ 1,437,419
<b>Margen neto por hectárea (f - (a+b+c+d+e))</b>	<b>\$ 1,221,323</b>
Costo unitario	\$ 199

Fuente: Elaboración propia en base a (ODEPA - Ministerio de Agricultura, 2022).

De acuerdo con los datos de las tablas anteriores se calcula el promedio de margen neto de los cultivos referenciados a las fichas, y se promedian para acercarse a los cultivos expuestos en el modelo WEAP del proyecto según lo estipulado por (AquaTerra, 2016). Estos cultivos presentes en las zonas de riego del estudio con el respectivo cálculo promediado de beneficio neto, y agrupados por tecnificados y no tecnificados se presentan en la Tabla 4-27.

Tabla 4-27 Resumen de beneficio o margen neto promedio por cultivos y zonas de riego.

ZR_COS_03			
NO TECNIFICADO	€/Ha	TECNIFICADO	€/Ha
CEREALES	48 €	CEREALES	749 €
HORTALIZAS	1,284 €	HORTALIZAS	1,709 €
		CITRICOS	1,626 €
		KIWI	958 €
		OLIVO	1,648 €
		PALTO	3,279 €
		VID	4,533 €
ZR_ELQ_08			
NO TECNIFICADO	€/Ha	TECNIFICADO	€/Ha
CEREALES	48 €	CEREALES	749 €
HORTALIZAS	1,284 €	HORTALIZAS	1,709 €
		CITRICOS	1,626 €
		OLIVO	1,648 €
		PALTO	3,279 €
		VID	4,533 €

Fuente: Elaboración propia en base a (ODEPA - Ministerio de Agricultura, 2022).

### Demanda de cultivo por Zona de Riego

#### Hectáreas de riego demandadas

Las siguientes gráficas exponen las demandas por hectáreas y por año que son demandas en las zonas de riego del estudio, ZR\_COS\_03 y ZR\_ELQ\_08. Se han extraído los resultados de los modelos históricos con cambio climático (ELQUI\_CSIRO\_REVC y ELQUI\_CCSM4\_REVC), considerando los dos Modelos de Circulación General (MCG) correspondientes a CSIRO y CCSM4.

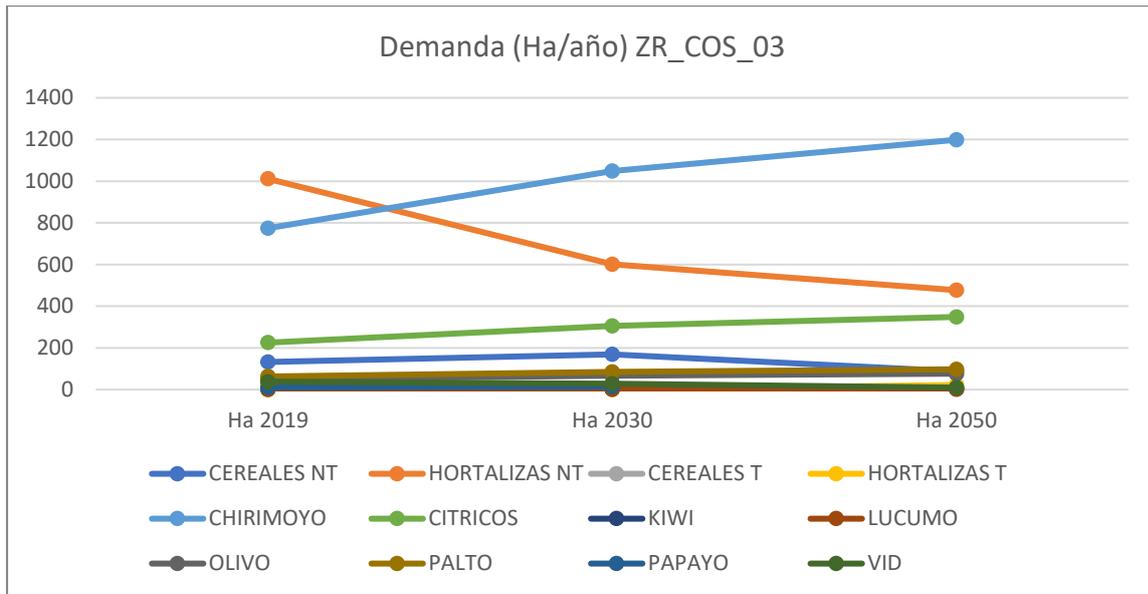


Figura 4-29. Gráfica de Demanda (Ha/año) ZR\_COS\_03

Fuente: Elaboración propia

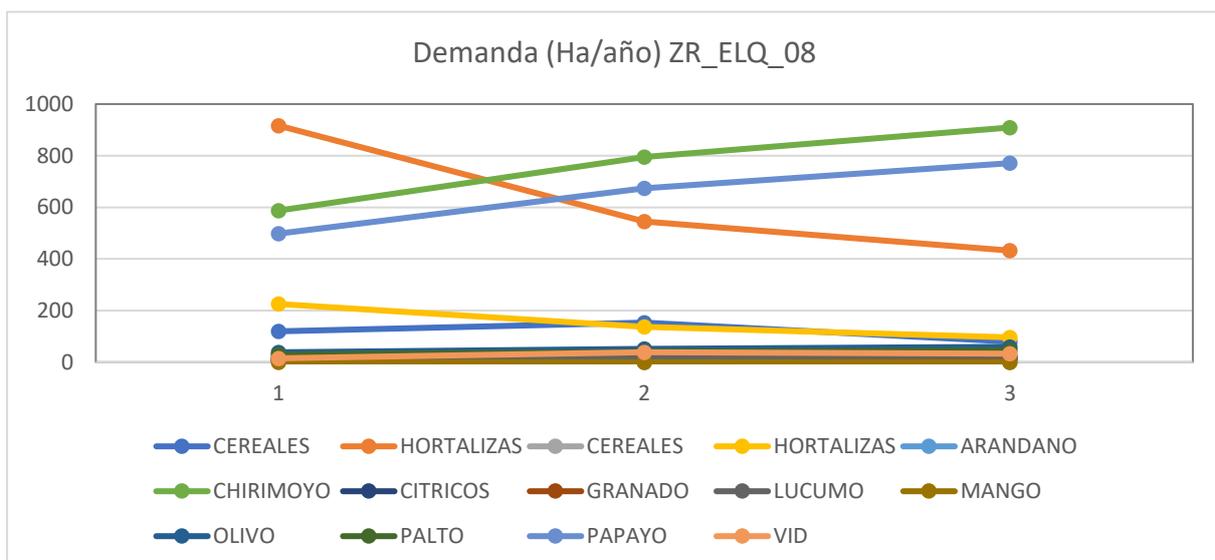


Figura 4-30. Gráfica de Demanda (Ha/año) ZR\_ELQ\_08.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-31 se presenta la evolución por hectáreas a lo largo de los años. Los datos observados son lineales ya que se realizan censos Agropecuarios cada 10 años aproximadamente para todos los cultivos de manera homogénea. Estos censos se van actualizando cada cierto año y no entregan exactamente todos los datos de los mismos cultivos secuencialmente su evolución, estos se realizan solo cada 10 años. Por lo anterior ello

se utilizan los datos incluidos en el Modelo WEAP de PEGH, para ser consistente con los análisis de datos.

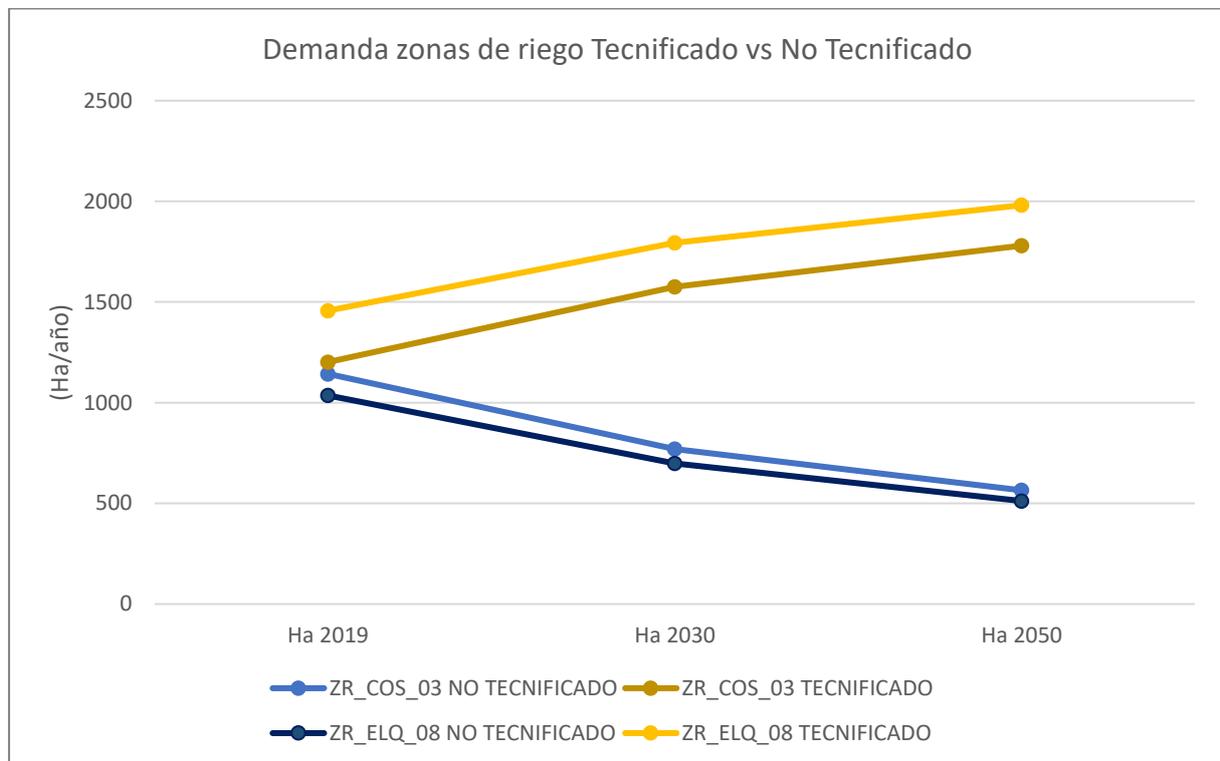


Figura 4-31. Gráfica de demanda en zonas de riego comparativa Tecnificado vs No Tecnificado.

Fuente: Elaboración propia

### Demanda de agua

De acuerdo con los datos extraídos de WEAP del modelo Estero El Culebrón, la demanda de agua de la zona en hectómetros cúbicos por año desde el canal Bellavista se muestra en la siguiente gráfica.

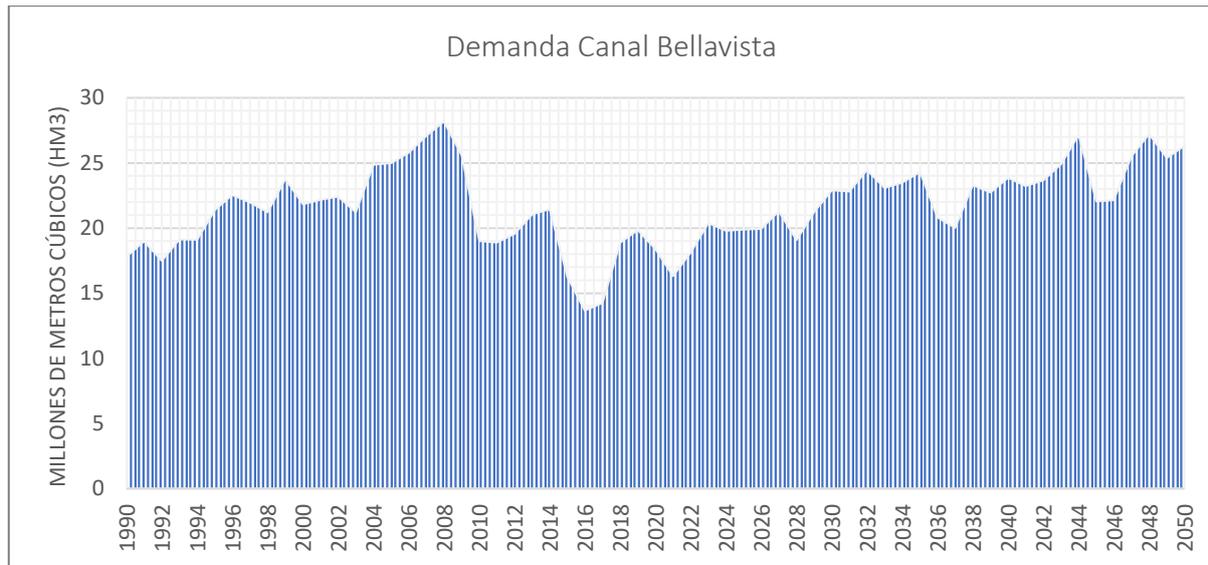


Figura 4-32 Demanda de riego en canal Bellavista.

Fuente: Elaboración propia.

El año 2023 se ha realizado un trabajo (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023) para estimar el valor marginal del agua de riego en la cuenca del río Elqui a través de una modelación agroeconómica. En este trabajo se estimaron funciones de beneficio neto de demanda de agua en la cuenca, dividiendo en principio en tres sectores. Estos sectores fueron los siguientes:

- El Sector 1 (alto Elqui) considera los ríos Turbio y Claro o Estero Derecho y su unión que da origen al río Elqui hasta el embalse Puclaro donde se ubica la ciudad de Vicuña.
- Sector 2 (Elqui medio) se ubica aguas abajo del embalse Puclaro hasta el cruce entre el río Santa Rosa Arroyo y Río Elqui.
- Sector 3 (zona costera) cubre el área metropolitana de La Serena y Coquimbo y la zona hortícola de Pan de Azúcar.

En el caso del presente trabajo, la ubicación se canal Bellavista y el sector del estero El Culebrón hace referencia al Sector 3. La Ecuación 13 corresponde a los beneficios netos del Sector 3 y se representan en la siguiente figura.

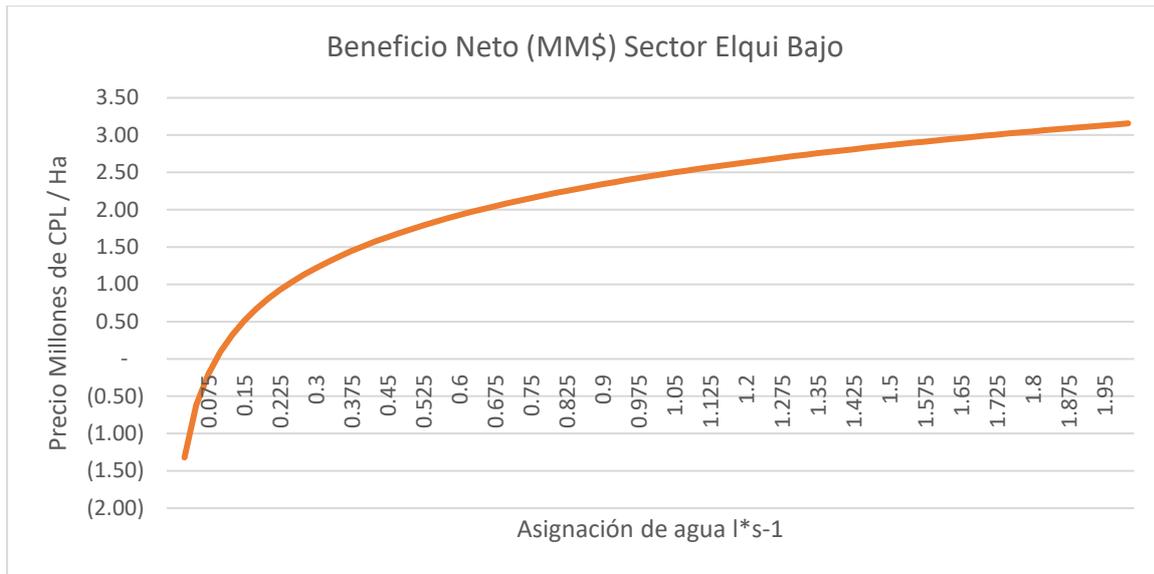


Figura 4-33. Curva de beneficios netos sector 3, Elqui bajo.

Fuente: Elaboración propia en base a (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023)

La Ecuación 14 corresponde a la demanda de agua y su precio por hectárea del Sector 3 (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023) siendo la derivada de los beneficios netos y se representan en la siguiente figura.

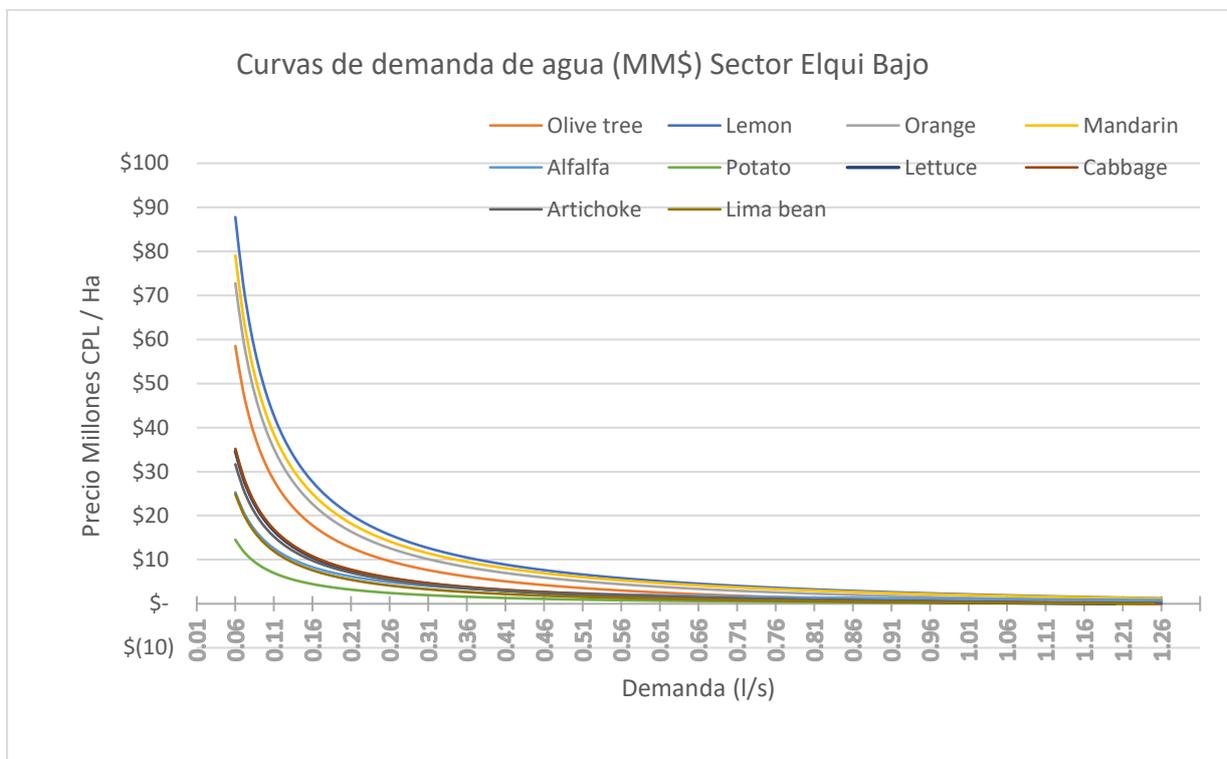


Figura 4-34. Curva de demanda de agua sector Elqui bajo.

Fuente: Elaboración propia en base a (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023)

El rendimiento máximo (equivalente al requerimiento de agua del cultivo, CWR) se alcanza con asignaciones de agua entre  $0.7 \text{ L s}^{-1}$  y  $1.25 \text{ L s}^{-1}$ , según lo indica “la Tabla 3” de (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023) Para el Sector 3.

#### Margen neto de cultivos

El margen neto de cultivo está dado por la En la Tabla 4-28. se presentan las ganancias anuales en euros € de los cultivos, considerando cultivos no tecnificados y tecnificados de cada zona de riego mencionada y sus hectáreas de riego variadas entre los años 2019 y 2050 correspondientes a cultivos frutales y anuales.

Tabla 4-28. Margen bruto de zonas de riego para consideradas en €/ha.

Año	Magen Neto €/ha ZR_COS_03	Magen Neto €/ha ZR_ELQ_08	Margen Neto Total (€)
2019	€ 2,164,623.40	€ 1,828,666.33	3,993,289.7 €
2020	€ 2,164,624.40	€ 1,828,666.33	3,993,290.7 €
2021	€ 2,164,625.40	€ 1,828,666.33	3,993,291.7 €
2022	€ 2,164,626.40	€ 1,828,666.33	3,993,292.7 €
2023	€ 2,164,627.40	€ 1,828,666.33	3,993,293.7 €
2024	€ 2,164,628.40	€ 1,828,666.33	3,993,294.7 €
2025	€ 2,164,629.40	€ 1,828,666.33	3,993,295.7 €
2026	€ 2,164,630.40	€ 1,828,666.33	3,993,296.7 €
2027	€ 2,164,631.40	€ 1,828,666.33	3,993,297.7 €
2028	€ 2,164,632.40	€ 1,828,666.33	3,993,298.7 €
2029	€ 2,164,633.40	€ 1,828,666.33	3,993,299.7 €
2030	€ 1,814,330.32	€ 1,356,357.55	3,170,687.9 €
2031	€ 1,814,331.32	€ 1,356,357.55	3,170,688.9 €
2032	€ 1,814,332.32	€ 1,356,357.55	3,170,689.9 €
2033	€ 1,814,333.32	€ 1,356,357.55	3,170,690.9 €
2034	€ 1,814,334.32	€ 1,356,357.55	3,170,691.9 €
2035	€ 1,814,335.32	€ 1,356,357.55	3,170,692.9 €
2036	€ 1,814,336.32	€ 1,356,357.55	3,170,693.9 €
2037	€ 1,814,337.32	€ 1,356,357.55	3,170,694.9 €
2038	€ 1,814,338.32	€ 1,356,357.55	3,170,695.9 €
2039	€ 1,814,339.32	€ 1,356,357.55	3,170,696.9 €
2040	€ 1,814,340.32	€ 1,356,357.55	3,170,697.9 €
2041	€ 1,814,341.32	€ 1,356,357.55	3,170,698.9 €
2042	€ 1,814,342.32	€ 1,356,357.55	3,170,699.9 €
2043	€ 1,814,343.32	€ 1,356,357.55	3,170,700.9 €
2044	€ 1,814,344.32	€ 1,356,357.55	3,170,701.9 €
2045	€ 1,814,345.32	€ 1,356,357.55	3,170,702.9 €
2046	€ 1,814,346.32	€ 1,356,357.55	3,170,703.9 €
2047	€ 1,814,347.32	€ 1,356,357.55	3,170,704.9 €

Año	Magen Neto €/ha ZR_COS_03	Magen Neto €/ha ZR_ELQ_08	Magen Neto Total (€)
2048	€ 1,814,348.32	€ 1,356,357.55	3,170,705.9 €
2049	€ 1,814,349.32	€ 1,356,357.55	3,170,706.9 €
2050	€ 1,724,897.90	€ 1,146,132.28	2,871,030.2 €

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 7. se encuentra el detalle de los cálculos de margen bruto por cultivo de las zonas de riego estudiadas.

En la Figura 4-35 se presenta una gráfica la estimación de beneficios netos considerando lo expuesto en la Figura 4-33. Curva de beneficios netos sector 3, Elqui bajo. presentes en (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023) , calculado a través de la demanda de agua y lo expuesto en la metodología del presente trabajo.

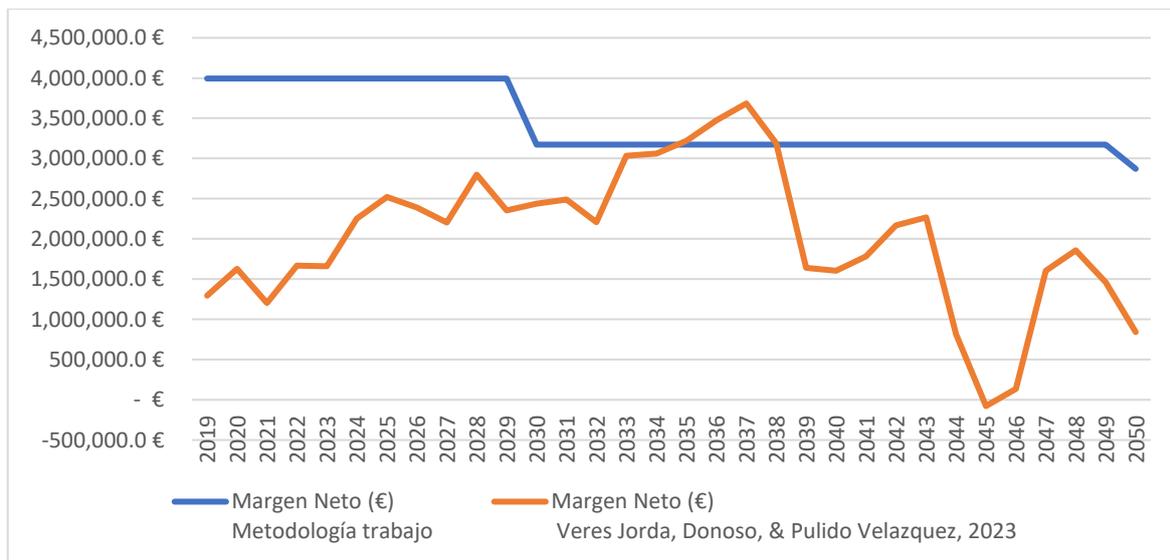


Figura 4-35. Comparativa de estimación de beneficios netos.

Se observa que los beneficios netos estimados por (Veres Jorda, Donoso, & Pulido Velazquez, 2023) son menores en un 41%, esto se debe a la estimación global de la zona Elqui Bajo- Zona Costera, a diferencia de la metodología del trabajo que se enfoca directamente en los cultivos de las zonas de riego del estudio. Por lo anterior nos quedamos con esa estimación a pesar de tener tendencias más bien lineales, pero que se ajustan a lo identificado en el modelo WEAP.

#### 4.6.4 Cálculo de evaluación hidroeconómica

##### Beneficios administración del recurso para riego

En el gráfico siguiente se muestra la relación de pérdidas de dinero (en euros) con el porcentaje (%) demanda insatisfecha para los MCG CSIRO y CCSM4 para cada año.

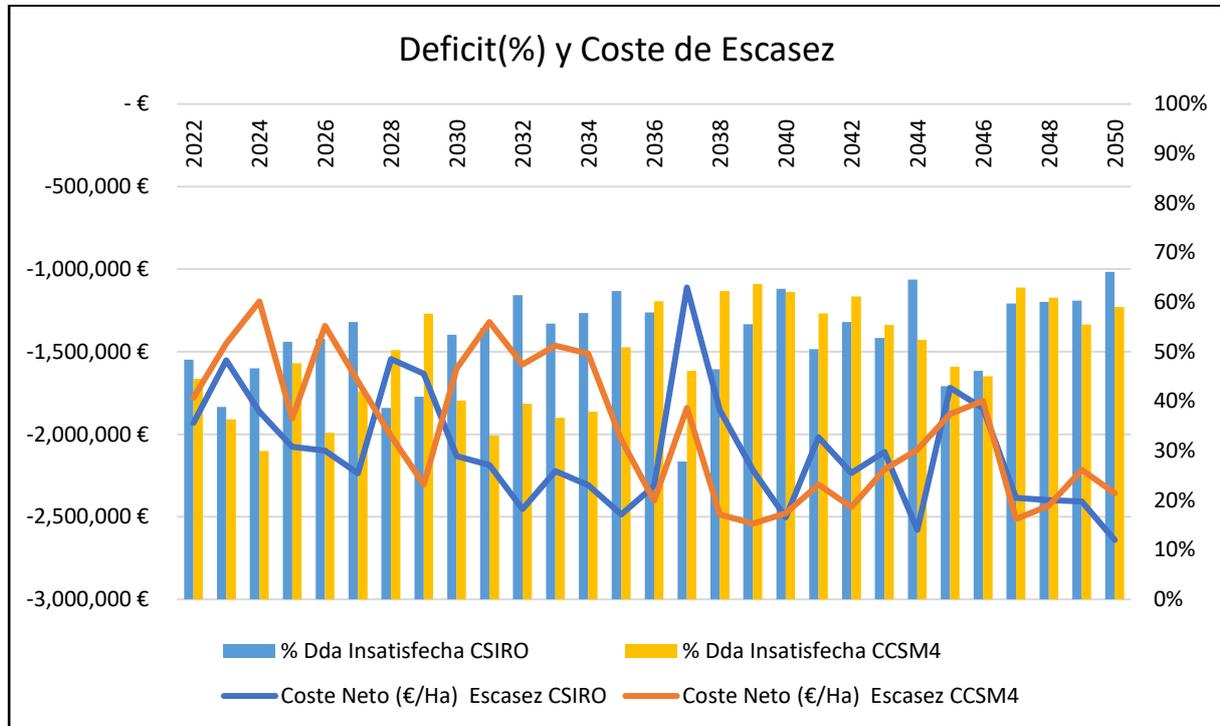


Figura 4-36. Relación de pérdidas de dinero con el coste de escasez para los MCG CSIRO y CCSM4.

Fuente: Elaboración propia.

Se observan variaciones importantes a lo largo de los años en el caso de los MCG, pero con una tendencia a aumentar el porcentaje de demanda insatisfecha. Además, se observa una diferencia notable de demanda insatisfecha entre los años 2029 y 2037 para ambos MCG. Sin embargo, se aprecia que el modelo CSIRO posee mayores pérdidas en este periodo de tiempo de notoria sequía.

Ya que la demanda de riego es satisfecha en un 100% con la reutilización de aguas se considera que el margen bruto insatisfecho es igual al margen bruto que se beneficiarían los regantes por concepto de satisfacer la demanda. En la Figura 4-37 se muestra el margen bruto del cual se beneficiarían los agricultores para el periodo de estudio.

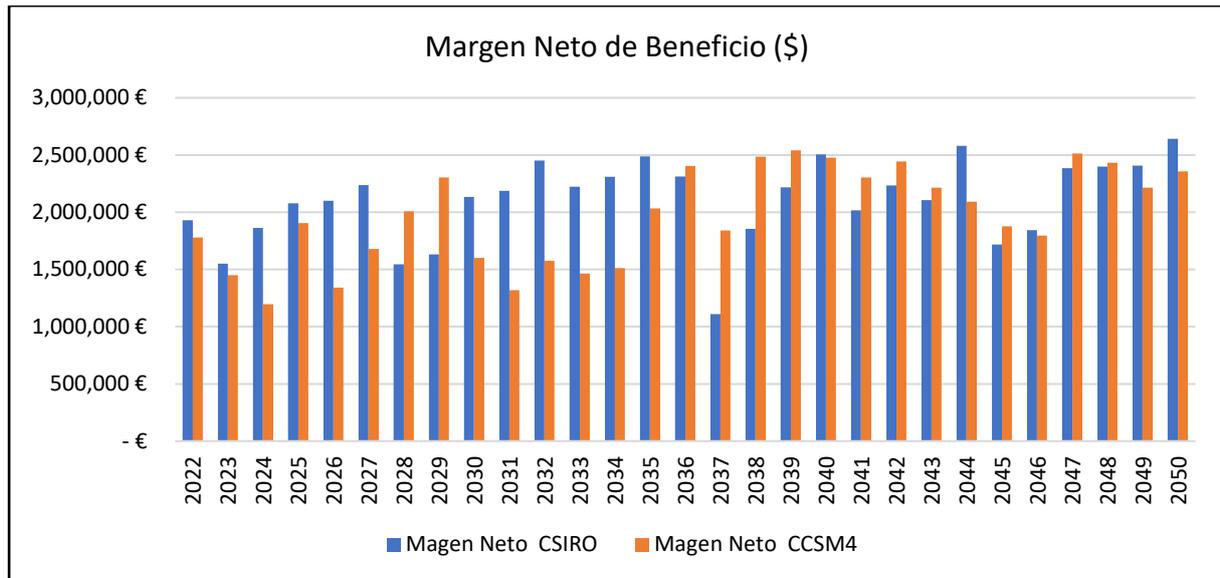


Figura 4-37. Margen bruto del cual se beneficiarían los agricultores.

Fuente: Elaboración propia.

El margen bruto para el MCG CSIRO es de € 61.061.705 mientras que el CCSM4 es de € 57.166.440, lo que equivale a un 7% de diferencia de beneficios esperados para las zonas de riego del estudio. Lo anterior hace referencia a que el MCG - CSIRO propone mayores sequías en sus series de tiempo.

#### Beneficios por recarga de acuíferos

Existe un excedente importante de agua desde las conducciones de agua con influencia de la reutilización de aguas servidas. Este excedente por un lado ingresa a los acuíferos por medio de las pérdidas identificadas en el canal Bellavista, y también en el vínculo que tiene este canal con los acuíferos de la zona de riego, donde el canal llega directamente al acuífero Culebrón e indirectamente a través de la infiltración generada en las zonas de riego estudiadas.

#### Beneficio por aumento de oferta hídrica

El aumento de los niveles del acuífero genera un incremento de oferta hídrica para las demandas que están inscritas con derechos de aguas subterráneas, otorgados en su mayoría para consumo de agua potable, industria y minería. Para estimar los beneficios que genera la inclusión de recarga de acuíferos, se ha estimado la cantidad de caudal excedente que ingresaría a los acuíferos, con un desfase de tiempo de 1 año debido a las condiciones de permeabilidad, de acuerdo con los tipos de suelo encontrados en la zona, que facilitan su

infiltración, como lo son rellenos conformados básicamente por gravas y arenas de un carácter freático o libre (Dirección General de Aguas (DGA), 2006).

Debido a que las demandas mencionadas de los acuíferos necesitan una calidad distinta, se considera la eficiencia que poseen los tipos de tratamientos como se identifica en la siguiente tabla (ver Tabla 4-29).

Tabla 4-29. Eficiencia de remoción mediante alternativas de Lodos Activados y sistemas MBR.

Parámetro	Lodos Activados	MBR
DBO5	90-95%	95-99%
SST	85-95%	95-98%
Nitrógeno Total	70-90% incluyendo desnitrificación	94-99%
Fósforo Total	70-90% incluyendo proceso	95-98%
Coliformes fecales	60-90%	90-99%

Fuente: (Unites States Enviromental Protection Agency Protección, 2007).

Tomando en cuenta los excedentes que genera la nueva oferta hídrica infiltran en los acuíferos circundantes, se han calculado los beneficios que tendría este volumen de agua, el cual será aprovechado por otros usuarios. Para ello se multiplica el coste de agua según (Agua Advise, 2014) por el volumen calculado volumen. En la Tabla 4-30. se determina el beneficio anual por concepto de recarga indirecta de acuíferos según tipo de tratamiento, ponderación de eficiencia y el coste en pesos chilenos que significan.

Tabla 4-30. Beneficio por recarga de acuíferos.

Año	Excedente Ac Culebrón CSIRO (MM m3)	CSIRO (\$) Lodos	CSIRO (\$) Membrana	Excedente Ac Culebrón CCSM4 (MM m3)	CCSM4 (MM m3) Lodos	CCSM4 (MM m3) Membrana
2022	4.22	€ 4,734,249.46	€ 5,830,517.61	5.20	€ 5,394,843.14	€ 5,830,517.61
2023	5.35	€ 5,511,937.46	€ 6,902,585.95	5.07	€ 5,325,553.23	€ 6,902,585.95
2024	4.31	€ 4,833,851.85	€ 5,953,879.52	7.81	€ 7,181,894.16	€ 5,953,879.52
2025	3.48	€ 4,299,421.29	€ 5,204,500.04	4.40	€ 4,912,166.95	€ 5,204,500.04
2026	3.62	€ 4,409,497.97	€ 5,349,659.51	7.10	€ 6,742,989.40	€ 5,349,659.51
2027	2.47	€ 3,658,965.08	€ 4,300,165.19	3.78	€ 4,538,904.56	€ 4,300,165.19

Año	Excedente Ac Culebrón CSIRO (MM m3)	CSIRO (\$) Lodos	CSIRO (\$) Membrana	Excedente Ac Culebrón CCSM4 (MM m3)	CCSM4 (MM m3) Lodos	CCSM4 (MM m3) Membrana
2028	7.28	€ 6,902,178.60	€ 8,794,152.21	7.66	€ 7,156,107.76	€ 8,794,152.21
2029	6.25	€ 6,231,974.95	€ 7,856,004.68	3.47	€ 4,371,391.35	€ 7,856,004.68
2030	2.96	€ 4,051,924.43	€ 4,822,020.93	1.53	€ 3,089,828.39	€ 4,822,020.93
2031	2.98	€ 4,084,068.47	€ 4,858,615.86	6.41	€ 6,382,392.52	€ 4,858,615.86
2032	0.71	€ 2,585,286.26	€ 2,770,113.52	3.93	€ 4,742,064.29	€ 2,770,113.52
2033	3.15	€ 4,240,200.14	€ 5,059,048.60	5.71	€ 5,953,768.63	€ 5,059,048.60
2034	2.68	€ 3,944,253.37	€ 4,639,990.79	4.87	€ 5,412,634.83	€ 4,639,990.79
2035	1.39	€ 3,102,097.40	€ 3,462,679.35	3.26	€ 4,359,984.43	€ 3,462,679.35
2036	4.77	€ 5,389,350.49	€ 6,629,091.01	6.60	€ 6,619,086.68	€ 6,629,091.01
2037	11.53	€ 9,939,769.81	€ 12,936,828.20	10.01	€ 8,925,818.59	€ 12,936,828.20
2038	6.55	€ 6,627,389.16	€ 8,330,444.46	4.42	€ 5,200,070.05	€ 8,330,444.46
2039	5.02	€ 5,622,916.53	€ 6,927,488.80	3.18	€ 4,389,643.31	€ 6,927,488.80
2040	2.95	€ 4,261,818.31	€ 5,029,428.67	2.38	€ 3,878,406.81	€ 5,029,428.67
2041	6.46	€ 6,635,384.24	€ 8,315,217.59	5.78	€ 6,181,534.86	€ 8,315,217.59
2042	5.21	€ 5,821,827.70	€ 7,177,001.62	3.84	€ 4,905,459.38	€ 7,177,001.62
2043	5.60	€ 6,107,107.02	€ 7,563,945.92	3.91	€ 4,972,163.56	€ 7,563,945.92
2044	1.47	€ 3,362,935.55	€ 3,745,741.25	2.26	€ 3,891,880.27	€ 3,745,741.25
2045	9.80	€ 8,965,438.06	€ 11,513,127.08	9.89	€ 9,023,888.27	€ 11,513,127.08
2046	9.34	€ 8,681,824.30	€ 11,110,139.88	10.67	€ 9,572,699.15	€ 11,110,139.88
2047	4.59	€ 5,522,594.09	€ 6,715,532.24	5.48	€ 6,122,238.60	€ 6,715,532.24
2048	3.75	€ 4,983,679.02	€ 5,957,984.37	3.09	€ 4,545,023.90	€ 5,957,984.37
2049	5.07	€ 5,892,918.69	€ 7,210,466.71	6.50	€ 6,855,002.88	€ 7,210,466.71
2050	3.24	€ 4,695,445.30	€ 5,538,609.59	5.07	€ 5,922,251.85	€ 5,538,609.59

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la tabla determina que el beneficio que se obtendría por la recarga de acuíferos es mayor con el tratamiento de membranas, debido a que su calidad es mayor y por ende puede ser más accesible su uso en otro tipo de demandas, como la industrial y de agua potable.

Beneficio por gestión de servicios del humedal urbano-costero El Culebrón.

Los beneficios de un humedal corresponden a un valor ecosistémico, usos bienes servicios, y atributos. También se define en términos globales, como un sistema o proceso natura, de comunidad o vida silvestre. Existen servicios ambientales por parte de los humedales, estos están asociados al bienestar social, ya que interaccionan con los ecosistemas o procesos de ecología que permiten obtener beneficios ambientales, pero también económicos y sociales.

Este el caso particular del estudio abordaremos el humedal urbano del estero El Culebrón, esté se presenta en la Figura 4-38, dando una imagen global de su interacción con un entorno urbanizado.



*Figura 4-38 Vista área del humedal El Culebrón.*

Fuente: (Araya, Salas, & Cecilia, 2019)

En la región de Coquimbo el humedal El Culebrón es uno de los más importantes, y este sirve de ejemplo para identificar las interacciones entre los diferentes componentes como el agua, el suelo, flora y fauna (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007). Estos componentes pueden ser biológicos, químicos o físicos, y cumplen ciertas funciones trascendentales como son las siguientes:

a) Control de inundaciones

Los humedales juegan un papel importante en la protección contra inundaciones. Su función es mantener el agua en la superficie, protegiendo así a las poblaciones y los hábitats río abajo. La destrucción de superficies inundables para usarlas en agricultura o asentamientos urbanos reduce este beneficio (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

b) Recarga y descarga de aguas subterráneas

Cuando existen capas impermeables e interactúan con la acumulación de agua subterránea la llamamos recarga y se debe al movimiento descendente del agua desde los humedales hacia los acuíferos subterráneos, mientras que la descarga de aguas subterráneas es el movimiento ascendente del agua para convertirse en agua superficial en los humedales (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

c) Retención de sedimentos y nutrientes

Los humedales pueden disminuir el poder del agua al ser un depósito natural de sedimentos transportados por el agua. Los sedimentos pueden obstruir las vías fluviales, por ende la acumulación en humedales es beneficiosa. Los nutrientes pueden acumularse en el subsuelo o sedimentos y pueden transformarse en por procesos químicos y biológicos o absorbidos por la vegetación de los humedales (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

d) Purificación de aguas

El agua de los humedales se filtra y se vuelve más pura cuando pasa a través de las rocas a medida que viaja bajo tierra. Los suelos y vegetación de los humedales ayudan significativamente a la purificación del agua. En el humedal se eliminan de manera eficiente las altas concentraciones de nutrientes, como el nitrógeno, el fósforo y, algunos tóxicos. Esto es crucial para evitar la eutrofización río abajo, que provoca un importante crecimiento de

plantas y algas, provocando una reducción del oxígeno, afectando algunas especies (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

#### e) Reservorios de biodiversidad

En cuanto a los servicios que brinda al medio ambiente, se puede afirmar que los humedales naturales crean hábitats para una variedad de organismos y por ende determinan el funcionamiento del medio ambiente y el bienestar humano. El área de Coquimbo, particularmente las playas y los humedales de Coquimbo y la Bahía de Dongoy, es donde las aves vuelan cada año desde otras partes de América del Norte y del Sur (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

#### g) Educación

Los humedales son excelentes lugares para involucrar al público y a los estudiantes de escuelas primarias, especialmente para actividades de aprendizaje en un ambiente divertido para aumentar la conciencia ambiental. Estas actividades cruzan los límites de la educación y el entretenimiento (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

#### h) Turismo

La cercanía al centro de la ciudad y al puerto de Coquimbo, sus características naturales y la diversidad de especies asociadas, hacen del estero El Culebrón un lugar propicio para el desarrollo de actividades turístico-educativas, ya que cuentan con paisajes únicos que hacen posible estas actividades. El ambiente aquí es propicio para la observación y el disfrute de la naturaleza, y para entrar en contacto con la naturaleza a través de la fotografía, los viajes terrestres y la observación de flora y fauna (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

#### i) Investigación y conservación genética

Los humedales son un excelente lugar para involucrar a los niños en edad preescolar y primaria, especialmente con actividades de aprendizaje en un ambiente divertido para aumentar la conciencia ambiental. Estas actividades cruzan los límites de la educación y el entretenimiento (Cerasa Arellano & Martínez Santelices, 2007).

Los componentes antes mencionados son difíciles de cuantificar monetariamente, ya que dependen de muchos factores. Sin embargo, existen varios estudios que buscan dale un beneficio monetario. Uno de estos estudios lleva por nombre *The Economic Value of Wetlands*

*in Urban Areas: The Benefits in a Developing Country* (Díaz-Pinzón, Sierra, & Trillas, 2022). Este estudio realizó una estimación de beneficios de varios humedales en el mundo, uno de ellos en Cali (Colombia), con un área urbana similar al humedal del estero El Culebrón, en la Figura 4-39 está la estimación de beneficios, ascendiendo a 2.520.211 dólares por año. Este valor se utilizará en el presente trabajo para cada año, con una tasa de crecimiento anual de beneficios del 1% de acuerdo con los datos del Servicios de Impuestos Internos de Chile.

**Table 5. Total value of urban wetlands in Cali with area constraint.**

ES *	N **	Minimum USD/ha/yr °	Maximum USD/ha/yr °	St. Deviation USD/ha/yr °	Mean USD/ha/yr °	Total ° Urban (33 ha)
Provisioning						
Food	8	6	5218	2101	2071	67,932
Water	3	79	78,842	45,459	26,351	864,422
Raw material	8	10	40,692	14,115	5806	190,451
Regulation and maintenance						
Climate regulation	2	1066	3854	1971	2460	80,709
Water flow regulation	1	449	449	NA ***	449	14,713
Waste treatment	4	37	24,509	12,133	6311	207,022
Habitat						
Maintenance of life cycle of migratory species	1	33,379	33,379	NA ***	33,379	1,094,962
	27	35,026	186,943		76,827	2,520,211

Note: \* Ecosystem services; \*\* number of value estimates; \*\*\* does not apply; ° international dollars. Year 2020.

Figura 4-39. Tabla de valores de beneficios de humedales urbanos en la ciudad de Cali.

Fuente: (Díaz-Pinzón, Sierra, & Trillas, 2022)

Una vez recopilado todos los antecedentes de costes y beneficios se utilizan las herramientas financieras de VAN y TIR de acuerdo con lo indicado en la metodología. En Anexo 8. se presentan los cálculos realizados para cada uno de los sistemas, considerando los dos MCG. Se utiliza la tasa de descuento de acuerdo con lo indicado en el Sistema Nacional de Inversiones de Chile (SIN), en referencia a la tasa de descuento de evaluación social para proyectos de estas características en este caso 6% (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2022).

### Resultados y comentarios.

Luego se realizar los cálculos pertinentes considerados en el Anexo 8. la evaluación hidroeconómica de los sistemas propuestos, se presenta a continuación, en la Tabla 4-31., un resumen de los resultados.

Tabla 4-31. Resumen de resultados de evaluación Hidroeconómica con VAN y TIR.

Sistema	Tratamiento	VAN	TIR
Sistema 1 -CSIRO	LA	€ 1,503,896	6,2%
	MBR	-€ 37,251,960.25	1,4%
Sistema 1 – CCSM4	LA	€ 5,040,564.89	6,7%
	MBR	-€ 38,408,027.14	1,2%
Sistema 2 - CSIRO	LA	€ 7,693,443.83	7,1%
	MBR	-€ 31,062,413.04	1,9%
Sistema 2 – CCSM4	LA	€ 11,230,112.10	7,6%
	MBR	-€ 32,218,479.93	1,8%

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos anteriormente se observa que los Valores Actuales Netos con tratamientos de lodos activados son positivos ( $VAN > 0$ ) en todas las soluciones, siendo el Sistema 2 - CCSM4 el de mayor valor. Por otro lado, los proyectos con membranas tienen valores negativos ( $VAN < 0$ ), por lo que financieramente debieran descartarse. Además, supondría el riesgo de invertir siete veces más de lo que significa la implementación de tratamientos con lodos activados. Cabe mencionar que un VAN menor a 0 no necesariamente significa que no se obtengan beneficios, también puede ser que no se están cumpliendo las expectativas del proyecto (Mate, 2014).

Si tomamos en cuenta las tasas de retorno, en todos los proyectos evaluados su valor es mayor a 0 ( $TIR > 0$ ), en el caso de los sistemas con lodos activados esta tasa es mayor a la esperada ( $TIR > 6\%$  (Td)), por lo que se espera recuperar la inversión a una mejor tasa. Por otro lado, los proyectos de membranas resultan con un  $TIR < 0$ , por lo que no generaría el beneficio esperado. Existe una sensibilidad importante en este punto, ya que los beneficios externos que se puedan generar por la recuperación de acuíferos, tanto económicos para otras demandas, como ambientales, debido a intrusión salina, podrían cambiar el panorama. Estos detalles no están dentro del alcance de este trabajo y podrán ser materia futuros proyectos de factibilidad.

## 5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

El presente trabajo evaluó la mejor forma de reutilizar las aguas residuales en una de las cuencas con mayor déficit de lluvia de Chile, brecha determinada en base a la revisión de antecedentes. Esta fue la motivación principal de realizar el presente trabajo y estudiar el caso de la cuenca del río Elqui, específicamente en una de las zonas con más estrés hídrico del sistema, el sector del estero El Culebrón.

Se analizó el actual Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Elqui en profundidad y se identificó que este plan no consideraba la alternativa de reúso, ni menos un análisis hidroeconómico de este.

Para lograr el objetivo principal estipulado de analizar desde un punto de vista económico el rol de reutilizar el agua proveniente de las plantas de aguas residuales en el sistema del río Elqui se utilizaron metodologías de cálculo vinculadas entre sí. Éstas son las siguientes:

- Cálculo de las aportaciones futuras de reutilización de aguas y selección de ubicación para su inclusión.
- Modelos de circulación general obtención de datos climáticos futuros para la zona de estudio procedentes de modelos de cambio climático.
- Implementación de un modelo gestión de recursos hídricos (empleando el software WEAP).
- Cálculo hidroeconómico de los resultados de la gestión, considerado evaluaciones hidroeconómicas.

Las metodologías antes mencionadas no estuvieron exentas de limitaciones. La escasa homogeneidad de datos en detalle de la zona de estudio es un constante punto de mejora. Los datos a nivel de cuenca también son deficientes y requieren un ajuste de acuerdo con nuevas herramientas.

Es importante destacar que la gestión de aguas residuales pertenece a una concesionaria privada o empresa sanitaria, por lo que no se tiene claro quiénes serían los verdaderos beneficiarios del posible caudal de oferta de reúso. Por un lado, la empresa de saneamiento podría adjudicarse este caudal y venderlo. Sin embargo, se espera que las nuevas Leyes y

normativas involucren al Estado como actor relevante para coordinar y subsidiar dicho recurso. Otra alternativa que se podría barajar es un intercambio de agua por agua con los regantes, también denominado SWAP de agua.

El modelo de gestión del estero El Culebrón generado en el presente trabajo dista del realizado en el PEGH, ya que no contempla el acople con Modflow, a pesar de utilizar los datos de resultado para generar sus datos de entrada. El modelo WEAP del El Culebrón considera al canal Bellavista como un trasvase desde el sistema del río Elqui hacia el estero El Culebrón. Este modelo tiene como objetivo simplificar la gestión hídrica del sector de estudio, pudiendo ser una herramienta de uso a nivel de usuario y de menor tiempo de resolución para la toma de decisiones. Además que los datos de entrada pueden ser modificados rápidamente, sin tener que realizar una reanálisis computacional complejo de todo el sistema que conlleve tiempo, expertiz y sofisticación informática.

Es importante señalar que la reciente normativa solo permite el uso de una fracción del potencial, ya que solo esta referida al reúso de aguas grises, lo que no generaría el efecto esperado y calculado en este trabajo. Se espera y recomienda que las nuevas Leyes puedan adaptarse a la brevedad a los estándares europeos, ya que las tecnologías existen para su implementación.

Se observa en la prefactibilidad que las zonas de riego identificadas pueden satisfacer sus demandas, disminuyendo su déficit al 100%, con una inversión que en un horizonte de 27 años y que trae beneficios a los agricultores del sector, además de otros aportes indirectos al humedal El Culebrón y demandas menores. Cabe destacar que la cercanía con las zonas de riego y la ciudad costera, optimizan los costes de implementación, debido el uso conjunto que se genera entre aguas superficiales y subterráneas. Se considera que los costes de incluir la impulsión son menores en comparación a conducir el agua en cotas más altas, como por ejemplo el embalse Puclaro, principal distribuidor del agua de la cuenca.

Por otra parte, el descenso en la presión de los acuíferos, provocada por los excedentes que genera el aparto de las aguas residuales tratadas en sectores como los acuíferos del Elqui bajo y del Estero el Culebrón, ayuda a mejorar la sustentabilidad de ellos y así enfrentar de mejor manera la crisis climática, con una gestión adecuada. Al incluir mayor recurso al sistema, el

excedente puede ser incluido por completo en los acuíferos y quitar presión al reparto de agua realizado por el Embalse Puclaro, (principal) e indirectamente al Embalse La Laguna, que trabaja coordinadamente con el anterior. Se hace imperativa la inclusión de Comunidades de Aguas Subterráneas para llevar una gobernanza integral entre todos los actores de la cuenca.

Otro beneficio que trae consigo aumentar los niveles de estos acuíferos costeros, es evitar la intrusión salina, para ello en futuros estudios se deberá calcular la cuña salina y la afección que tiene la entrada del mar en estos acuíferos. Además, considero en el presente estudio los beneficios económicos ambientales externos, provocado por el aumento de volumen de las aguas subterráneas costeras para el cálculo hidroeconómico.

Del análisis hidroeconómico se desprende que el sistema N°2 con los lodos activados es más rentable socialmente, al resultar con un VAN y TIR mayor en los dos MCG en comparación al Sistema 1, esto se debe a los costes de inversión menores del Sistema 2 de acuerdo con el trazado y características del sistema. A pesar de que el MCG CSIRO fue seleccionado por el PEGH del Elqui como el MCG más desfavorable, no existe una gran diferencia entre los resultados económicos de este con el de CCSM4, existiendo diferencias de 4% en VAN y 0,1% en el TIR. Se tiene claro que las proyecciones identifican tendencias, pero no que cada año va a ser así, por lo que aplicar un factor de descuento no es una praxis recomendada en la actualidad, pero que por la falta de datos de detalle se realizó de esta manera la estimación coste-beneficio.

Para futuros estudios se debe considerar evaluar nuevos escenarios climáticos y/o metodologías de cálculo actualizadas, que estarán sujetas a la precisión de datos aportados por las nuevas campañas de monitoreo que se pretenden realizar en la cuenca, ya que esta es una cuenca que marca un punto de inflexión dentro del país, como un límite de avance de la desertificación del país de norte a sur provocada por el cambio climático.

Subsanando las limitantes y con nuevos datos aportados, El Modelo del estero El Culebrón debiera mejorar, incluyendo más sectores de demanda a la evaluación, considerando cambios en cultivos e incluyendo la componente Modflow y calidad de aguas en el modelo. Con estas variantes entregadas, junto con leyes y gobernanza en orden, este trabajo podría pasar a una



etapa de factibilidad que considere la viabilidad económica de las inversiones, contemplando plazos, recursos, el flujo de trabajo y la situación del mercado.

## 6 REFERENCIAS

- Agua Advise. (2014). *Estudio técnico-económico comparativo entre la instalación de una planta desaladora y una planta de reutilización de aguas depuradas*. Coquimbo, Chile: Corporación Regional de Desarrollo Productivo.
- AMPHOS. (2014). *Generación de información base para la evaluación de normas de calidad y emisión: revisión y actualización sobre tecnologías y costos de abatimiento de contaminantes de residuos líquidos*. Informe Final.
- AquaTerra. (2016). *Estudio básico: Diagnostico para desarrollar Plan de Riego en cuenca de Elqui*. Provincia del Elqui, Chile: Corporación Nacional del Riego (CNR).
- Araya, A., Salas, S., & Cecilia, C. (2019). Percepción futura del humedal “El Culebrón”, Coquimbo (Chile): una experiencia educativa interdisciplinaria. *Revista Luna Azul*.
- Asociación española de desalación y reutilización. (22 de Marzo de 2022). *AEDyR*. Obtenido de Asociación española de desalación y reutilización: <https://aedyr.com/dia-mundial-agua-2022-desalacion-reutilizacion-agua-recursos-imprescindibles-salvaguardar-aguas-subterranas/>
- Avilés, J. L. (2018). Interacciones tróficas de *Australoheros facetus* (Perciformes: Cichlidae), pez exótico en el humedal El Culebrón, Coquimbo, Chile. Coquimbo, Chile: *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, 53, 99–105.
- Ayala, A. R. (2011). *Selección y aplicación de un modelo hidrológico para estimar los impactos del cambio climático en la generación de energía del Sistema Interconectado Central. Informe final*. . Santiago de Chile: Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Banco Central Chile. (22 de Agosto de 2022). <https://si3.bcentral.cl>. Obtenido de <https://si3.bcentral.cl/indicadoressiete/secure>
- Cerasa Arellano, M., & Martínez Santelices, L. (2007). *Determinación de Impactos Ambientales causados por el desarrollo urbano en el estero El Culebrón*. IV región, Chile: Universidad Católica del Norte, Facultad de Ciencias del Mar.
- Codagua. (7 de Febrero de 2018). Costos de inversión y explotación en soluciones de membranas.

- Comisión Nacional de Riego (CNR). (2017). *Análisis en gestión integrada de recursos hídricos ríos Elqui y Ñuble. Realizado por: CONIC-BF. [en línea] <> [consulta: 4 sept. Informe final. Ministerio de Agricultura, Comisión Nacional de Riego,. Santiago, Chile: Realizado por: CONIC-BF. Recuperado el 05 de abril de 2022, de <http://sad.dga.cl/>*
- CORFO/Diagua Consultores. (2019). *Desarrollo de un Modelo Regulatorio -Institucional-Financiero que Viabilice el Rehúso de las Aguas Residuales en Chile. Santiago, Chile.*
- Costwater. (2020). *Base de datos MBR. Obtenido de [http://www.costwater.com/membranes/mbr/mbr\\_database.php](http://www.costwater.com/membranes/mbr/mbr_database.php)*
- CRDP: Recursos Hídricos. (15 de octubre de 2021). *Corporación Regional de Desarrollo Productivo. Obtenido de [www.crdp.cl](http://www.crdp.cl): <https://crdp.cl/proyecto-de-recarga-de-acuiferos-ya-tiene-su-primer-pozo-instalado-y-beneficiara-a-25-mil-habitantes-cuando-comience-a-funcionar/>*
- Díaz-Pinzón, L., Sierra, L., & Trillas, L. (2022). The Economic Value of Wetlands in Urban Areas: The Benefits in a Developing Country. *Sustainability*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2006). *Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero del valle del Elqui. Santiago, Chile: Informe Técnico. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional. Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile.*
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017c). *Actualización del Balance Hídrico Nacional. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile: Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.*
- Dirección General de Aguas (DGA). (2018c). *Actualización del Balance Hídrico Nacional. Santiago, Chile.*
- Dirección General de Aguas (DGA). (2020). *Plan Estratégico de Gestión Hídrica del Elqui. Santiago, Chile.*
- Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A. (2020). *econssachile. Obtenido de [www.econssachile.cl](http://www.econssachile.cl): <https://www.econssachile.cl/proyectos/planta-de-reuso-de-as-salar-del-carmen>*

- EPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, USA.
- Escenarios Hídricos 2030. (2018). *Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile*.
- Escenarios Hídricos 2030. (2018). *Radiografía del agua: Lagunas y riesgos hídricos en Chile*. Santiago, Chile.
- FAO, O. d. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Roma, Italia.
- Fernandes Moreira, V. (2011). *La eficiencia del sistema de protección y reutilización del agua en España y Brasil. Un análisis jurídico ambiental derivado de la política de la unión Europa*. Salamanca, España: [Tesis Doctoral] Universidad de Salamanca.
- Fundación Chile. (2018). *Claves para la gestión de aguas residuales rurales*. Santiago, Chile: Fundación Chile.
- Global Water Intelligence. (2010). *Municipal water reuse markets 2010*. Oxford: Media Analytics.
- Godoy Bravo, J. F. (2021). *Análisis de disponibilidad de fuentes de agua en la zona centro-norte de Chile: Potencial rúso de aguas servidas en el sector agrícola y minero*. Santiago, Chile: [Tesis de grado]: Universidad de Chile.
- Gordillo, R. B. (28 de junio de 2023). [www.iagua.es](https://www.iagua.es/noticias/cedex/reglamento-ue-2020741-es-opportunidad-fomentar-uso-agua-regenerada-regadio). Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/cedex/reglamento-ue-2020741-es-opportunidad-fomentar-uso-agua-regenerada-regadio>
- GORE.A, C. (2015). *Plan Estratégico Para Enfrentar La Escasez Hídrica 2015 - 2025*.
- Interior. (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos*. Santiago, Chile.
- IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido, y Nueva York: Cambridge University Press: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M.
- Jenkins, G. (2020 de septiembre de 2020). [www.camara.cl](https://www.camara.cl). Obtenido de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTipo=DOCASEEXTERNA&prmId=49740>
- Kadlec, R. &. (2009). *Treatment Wetlands*.
- Magaña, V. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, J. y A. Fernández. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México*, págs. 17-27.

- Mate, L. M. (marzo de 2014). Valor actual neto y Tasa de retorno: su utilidad como herramienta para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Instituto de Investigacion en Ciencias Económicas y Financieras - Universidad La Salle - Bolivia*.
- Mateo-Sagasta, J. (2017). *Reutilización de aguas para agricultura en America Latina y el Caribe Estado, principios y necesidades*. Santiago, Chile: FAO.
- Medeiros, et al. (2005). Utilizacion de agua residual de origen doméstico en la agricultura. Estudio de alteraciones químicas. *Revista Brasileña de ingeniería Agrícola y ambiental*.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2022). *Precios Sociales 2022*. Santiago de Chile: Departamento de Metodologías - División de Evaluación Social de Inversiones.
- Ministerio de Obras Públicas. (06 de abril de 2022, p.37). Ley 21.345. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, pág. 37.
- Ministerio de Obras Públicas, M. (06 de abril de 2022, p.28). Ley 21.435. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, pág. 28.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). [www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es). Obtenido de <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacionhidrologica/default.aspx>.
- MOP.a, M. d. (2011). *Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025*. Santiago, Chile.
- MOP.b, M. d. (2016). *Minuta de embalses de riego, región de Coquimbo*. Santiago, Chile.
- Moriasi, D. A. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*.
- Moss, R., Edmonds, J., & et, a. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, 463, 747-756. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>
- ODEPA - Ministerio de Agricultura. (2022). <https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos>. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos>: <https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos>
- ODEPA.a. (2013). *Estudio : "Cambio Climático" Impacto en la Agricultura. HEldas y Sequias*. Santiago, Chile.
- Prats Rico, D. (2000). Conceptos generales sobre reutilización. Calidad de agua y usos posibles. 1-9.

- Pucara Aedo, F. G. (2022). Reutilización de aguas en España y Perú: avances y desafíos. *Sostenibilidad: económica, social y ambiental*, 82-83.
- Reznik, A. E. (2017). Economic implications of agricultural reuse of treated wastewater in Israel: A statewide long-term perspective.).
- Rico Amorós, A. M. (2016). *Depuración y reutilización de aguas residuales regeneradas en las regiones de Murcia y Valencia*. Alicante, España: Unión de Editoreales de Universidades Españolas.
- Salgot, M. (26 de Marzo de 2020). *iAgua*. Obtenido de [www.iagua.es](http://www.iagua.es): <https://www.iagua.es/blogs/miquel-salgot/reutilizacion-aguas-residuales-espana-realidad-o-deseo>
- Santibáñez Quezada, F., Santibáñez Varnero, P., & González, P. (2016). *Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050*. Santiago de Chile: Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP).
- Sherwood, S. B. (2014). *Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing*.
- SISS, S. d. (02 de enero de 2020). [www.siss.gob.cl](http://www.siss.gob.cl). Obtenido de <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-17498.html>
- SISS, S. d. (2021). *Estudios Tarifarios 2016-2021*. Obtenido de [www.siss.cl](http://www.siss.cl): <https://infota.siss.cl/concesiones/index.php?dir=empresas%2FAguasdelValle%2F>
- Unites States Enviaromental Protection Agency Protección. (2007). *Wastewater Management Fact Sheet Membrane Bioreactors*.
- Veres Jorda, E., Donoso, G., & Pulido Velazquez, M. (2023). Estimating the marginal value of irrigation water at a basin through agroeconomic modelling: a study in the elqui basin, Chile. *SSRN*, SSRN: <https://ssrn.com/abstr>.