



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE AGUAS DE USO
AGRÍCOLA: APLICACIÓN EN LA ZONA NORTE DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TOMÁS PABLO FLORES RAMÍREZ

PROFESORA GUÍA

KATHERINE LIZAMA ALLENDE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MARÍA PÍA MENA PATRI

ANA LUCÍA PRIETO SANTA

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: Tomás Pablo Flores Ramírez
FECHA: 6 de mayo de 2020
PROFESORA GUÍA: Katherine Lizama Allende**

**PROPUESTA PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE AGUAS DE USO
AGRÍCOLA: APLICACIÓN EN LA ZONA NORTE DE CHILE**

Chile presenta escasez hídrica y deficiencia en la calidad de las aguas para uso en riego. Además, la agricultura es uno de los sectores económicos que más agua consume. En la región de Coquimbo se utiliza para la agricultura el 83% del recurso hídrico total, regando 146.000 hectáreas, mientras que para Antofagasta un 17%, regando 1.814 hectáreas. La presencia de boro, sulfato, cloruro, arsénico, y sólidos disueltos totales, hace necesario encontrar nuevas fuentes, aplicar sistemas de tratamientos y utilizar cultivos tolerantes. Para fuentes de agua naturales se utilizan procesos de adsorción, de membrana, y otros procesos que facilitan la remoción, como lo son la oxidación/reducción para facilitar remoción de sulfato y/o arsénico.

A pesar de que se realizan esfuerzos importantes para tratar el agua natural, la salinidad y a veces la sodicidad de los suelos, impide que se produzca una solución de suelo óptima para el cultivo, y debido a la gran escala del problema, alternativas como la desalinización no presentan una solución definitiva, aun cuando los costos han disminuido rápidamente, llegando hasta aproximadamente 3 USD/m³.

El reúso de aguas servidas tratadas resuelve parcialmente la problemática, generando una nueva fuente con calidad relacionada a la del agua potable y su respectivo tratamiento en la planta de tratamiento de aguas servidas. Luego, la aplicación de la ley 20.998, Regulación Servicios Sanitarios Rurales, podrá impulsar el ámbito sanitario, permitiendo regular las problemáticas con las PTAS ya instaladas en el sector rural, y construir nuevos centros de tratamiento. Por otro lado, la ley N° 18.450, ley de fomento al riego, permite generar recursos para proyectos que permitan mejorar la calidad y eficiencia de la aplicación de agua de riego, siendo aplicable para la hidroponía.

Para utilizar las aguas servidas tratadas es necesario un proceso de filtración, tratamiento secundario y desinfección. Además, es necesario que el cultivo no tenga contacto con el agua de riego, que tenga menos de 1000 coliformes fecales/100 ml y se recomienda una DBO₅ menor a 30 mg/l. Una alternativa para cumplir este requisito es el uso de un humedal artificial con flujo subsuperficial con desinfección, o un proceso de lodos activados con desinfección.

Se propone la construcción de un sistema NFT y uno con fertirriego en localidades en Antofagasta: San Pedro de Atacama y Lasana, y dos en Coquimbo: la PTAS El Peñón y una PTAS rural. Se diseña un conjunto de sistemas NFT y fertirriego para satisfacer el 100% de la demanda de lechuga y tomate en las localidades, para lo que se requieren 167,4; 41,5; 11,2; 72,5 millones de pesos respectivamente, y un consumo del 2%, 17%, 8% y 2% con respecto al total ofertado de aguas servidas tratadas.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Organización del informe.....	2
2.	El agua en Chile: Situación de cantidad y calidad del recurso hídrico.	4
2.1	Contexto hidrológico de Chile.....	4
2.2	Calidad del recurso en Chile.....	6
3.	Situación hídrica de la zona norte de Chile, una mirada enfocada en la agricultura para la región de Antofagasta y Coquimbo.	10
3.1	Región de Antofagasta.....	11
3.2	Región de Coquimbo.....	15
3.3	La situación del sector agrícola en la región de Antofagasta y Coquimbo.	18
4.	La relación entre los contaminantes críticos y la agricultura.....	20
4.1	El rol del suelo en la agricultura.	20
4.2	Contaminantes críticos en el agua de riego.....	23
4.2.1	Salinidad.....	23
4.2.2	Boro.....	1
4.2.3	Azufre.....	2
4.2.4	Cloruro.....	4
4.2.5	Arsénico.....	6
4.3	Procesos de tratamiento para remover los contaminantes críticos identificados. 8	
4.3.1	Procesos específicos	8
4.3.2	Desalinización	10
5	Reúso de aguas residuales como nueva fuente	15
5.1	Contexto y consideraciones para el reúso en Chile.....	15
5.2	Reúso en la región de Antofagasta y Coquimbo.....	21
5.3	Tratamiento de aguas residuales en contexto de reúso.	24
5.3.1	Procesos convencionales de tratamiento de las aguas residuales.....	25
5.3.2	Fitorremediación de aguas residuales mediante humedales construidos: Características y consideraciones.....	28
6	Propuesta integral: Sistema hidropónico utilizando aguas servidas tratadas.	34
6.1	Aplicación: Reúso de aguas servidas tratadas.....	34
6.2	Aplicación: Cultivo sin suelo.....	40

7	Conclusiones y recomendaciones.....	55
8	Bibliografía.....	58
9.	Anexos.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Demanda (Consumo HH azul) de agua según Macrozona. Elaboración propia a partir de Escenarios hídricos 2030.	6
Tabla 2: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: NCh 1.333of78.....	8
Tabla 3: Clasificación de las aguas de riego según su salinidad. Fuente: NCh 1333.of78.	9
Tabla 4: Precipitación media anual en función de las Macrozonas. Fuente: DGA (2016).	10
Tabla 5: Características principales del Río Loa. Fuente: DGA (2016).....	11
Tabla 6: Caudales característicos en cuenca Río Loa. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017.....	11
Tabla 7: Caudales característicos en cuenca Salar de Atacama. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017.	11
Tabla 8: Resumen de demandas hídricas en miles de metros cúbicos por año, para la región de Antofagasta en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.	12
Tabla 9: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca del río Loa, Antofagasta. Adaptado DGA (2016)	13
Tabla 10: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca Salar de Atacama. Adaptado DGA (2016).	13
Tabla 11: Características de los principales ríos en la región de Coquimbo. Fuente: DGA (2016)	15
Tabla 12: Resumen de demandas hídricas para la región de Coquimbo en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.....	16
Tabla 13: Valores de parámetros de calidad para los principales ríos de la región de Coquimbo. Fuente: Pastén et al. (2018).	17
Tabla 14: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017).....	17
Tabla 15: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017) (continuación).	17
Tabla 16: Superficie plantada y porcentaje según tipo de cultivo para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).	18
Tabla 17: Superficie regada y su porcentaje con respecto al total, según tipo de sistema de riego para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).	19
Tabla 18: clasificación de suelos según pH, CE y PSI. Fuente: Adaptado de Courel, F. (2019)..	21
Tabla 19: Tolerancias de algunos cultivos según porcentaje de sodio intercambiable en el suelo. Fuente: García, A. (2012).	23
Tabla 20: Clasificación de los cultivos según el contenido de boro. Fuente: Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies, 1996.....	2
Tabla 21: Concentraciones de sulfato críticas para tejidos de diferentes cultivos. Fuente: Grant, C., Hawkesford, M. (2015).	4
Tabla 22: Concentraciones críticas de aguas de riego por aspersión cloruradas sódicas para las cuales los cultivos presentan riesgo de daños foliares. Fuente: Adaptado de Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996).	6

Tabla 23: Concentraciones máximas en la solución del suelo, a partir de las cuales aparecen síntomas de toxicidad por cloruro. Fuente: Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996).....	6
Tabla 24: Caracterización del tipo de agua según el contenido de sal. Fuente: Fritzmann, C., Löwenberg, Wintgens, T., Melin, T., 2007.	10
Tabla 25: Consumo de energía, costos de producción e inversión para los procesos de Osmosis Inversa (OI), Destilación Multi efecto (MED), Flash multietapa (MSF) y electrodiálisis (ED). Fuente: Fraunhofer (2017); Brakemeier, D. (2015).	13
Tabla 26: Porcentaje de remoción de contaminantes para tecnologías de destilación en comparación con tecnologías de membrana. Fuente: Fraunhofer Chile, 2017	14
Tabla 27: Diferentes peligros asociados al uso de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento deficiente en la agricultura. Fuente: Adaptado de OMS (2006), por FAO (2017).....	18
Tabla 28: Factibilidad y consideraciones de riego para el cultivo mediante aguas tratadas. Fuente: Adaptado de FCH, 2018.	19
Tabla 29: Caudales de aguas servidas a recolectar según territorio operacional en Antofagasta. Fuente: Informe DGA (2016), realizado por ARCADIS.	21
Tabla 30: Comparación de costo, eficacia y espacio requerido de distintos sistemas de tratamientos de aguas servidas. Fuente: Libhaber, Orozco-Jaramillo (2012).	27
Tabla 31: Comparación entre tratamientos biológicos para aguas residuales. Fuente: Conagua, 2015.	27
Tabla 32: Tipos de procesos de tratamiento y los contaminantes que usualmente remueve. Fuente: Conagua, 2015.	28
Tabla 33: Procesos que participan en la fitorremediación. Fuente: Hermen, S. (2011), Greipsson, S. (2011)	29
Tabla 34: Ejemplos de tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas, mediante humedales construidos de flujo horizontal sub-superficial. Fuente: Vymazal, J. (2009).....	31
Tabla 35: Parámetros de diseño para humedales construidos horizontales de flujo subsuperficial y superficial. Fuente: Sun, G., & Cooper, D. (2008); Kadlec, Robert & Wallace, Scott. (2008)	33
Tabla 36: Análisis comparativo entre una propuesta de reúso en el sector urbano y el rural. Elaboración propia.....	35
Tabla 37: Límites máximos de ciertos contaminantes para el DS 90 y la norma de riego NCh 1333. El estado representa si la calidad de la tabla 1 del decreto supremo 90 es más estricta que la de la norma de riego, si no lo es, necesita tratamiento. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 38:Requerimientos de tratamiento del agua en función del uso (reúso) que se le quiera dar. Fuente: Conagua, 2015.	38
Tabla 39: Características de los cuatro casos propuestos: sector, localidad, población servida, tratamiento y caudal. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 40: Parametros de diseño para un humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 41: Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico. Fuente: Zárate, M., 2014; Beltrano, J., Gimenez, D., 2015.	42
Tabla 42: Micronutrientes y macronutrientes en plantas. Fuente: Beltrano, J., Gimenez, D. (2015)	43
Tabla 43: Sales fertilizantes que comúnmente se utilizan en hidroponía. Fuente: Adaptado de Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.	45
Tabla 44: Elementos y parametros de diseño para un sistema de cultivo hidropónico. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 45: Requerimientos de lechuga por sector, y cantidad de sistemas NFT necesarios para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.	47

Tabla 46: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos NFT en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 47: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 48: Regla general para el riego con respecto al amanecer y al atardecer.	51
Tabla 49: Requerimientos de tomates por sector, y cantidad de sistemas de fertirriego requeridos para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 50: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos mediante fertirriego en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 51: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 52: Costos y caudales totales para sistemas NFT y fertirriego para las cuatro localidades. Se incluye porcentaje utilizado con respecto a la oferta de aguas servidas tratadas. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 53 Producción total de diseño de lechuga y de tomate. Rendimiento por metro cuadrado cultivado sin planta de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.	54

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Efectos del cambio climático en Chile. Fuente: FCH, 2018.	5
Ilustración 2: Oferta referencial para aguas superficiales y subterráneas. Escenarios Hídricos 2030, basado en Vargas, 2017.	6
Ilustración 3: Distribución de Macrozonas en Chile. Fuente: Adaptado de MOP (2017).	7
Ilustración 4: Mapa físico de la región de Antofagasta y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.)	12
Ilustración 5: Mapa resumen de calidad de las fuentes de la región de Antofagasta. Fuente: DGA, 2016.	14
Ilustración 6: Mapa físico de la región de Coquimbo y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.)	15
Ilustración 7: Efectos osmóticos en una planta de apio debido a un incremento en la conductividad eléctrica de 0 a 12 mS/cm. Fotografía: L. Francois. Fuente: Grattan, S. 2018.	24
Ilustración 8: Producción relativa de un cultivo en función del a salinidad promedio en las raíces, el área bajo la curva define la tolerancia o sensibilidad a la salinidad. Fuente: Grattan, S. 2018.	25
Ilustración 9: Tolerancia de los cultivos a la salinidad, medida a partir de la conductividad eléctrica del agua de riego, según sus rendimientos. También se muestra la tolerancia para el boro. Fuente: Grattan, S. (2018).	26
Ilustración 10: Especiaciones del arsénico según potencial redox y pH, a 25°C y 1 bar de presión. Fuente: Rangel et al. (2015)	7
Ilustración 11: Barreras múltiples para reducir riesgo en riego mediante reúso de aguas residuales. Fuente: FAO, 2017.	16
Ilustración 12: Emisarios submarinos a nivel nacional. Fuente: FCH, 2018.	17
Ilustración 13: Visión holística del Desarrollo de Capacidades Institucionales. Fuente: FAO, 2017.	20
Ilustración 14: Representación gráfica de un proceso convencional de lodos activados. Fuente: Adaptado de Ramalho, 1996, por TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.	26
Ilustración 15: Esquema de reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Fuente: TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.	26

Ilustración 16: Humedal de flujo superficial (arriba) y sub-superficial (abajo). Fuente: Vidal, G., Jarpa, M., Plaza, C., Belmonte, M., Mariangel L. (s.f.)	29
Ilustración 17: Multi-banda 3CP para el sistema NGS, (Arriba izquierda), Forraje Verde Hidropónico (Arriba derecha); Sistema hidropónico Nutrient Film Technique en invernadero (Abajo izquierda). Sistema hidropónico de Raíz Flotante (Abajo derecha). Fuente: NGS New Growing system (2020), Groho (2020), Agriculturers (2015), PortalFrutícola (2019).....	41
Ilustración 18: Concentración de nutrientes en solución nutritiva según varios autores. Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.	44
Ilustración 19: Esquema referencial de sistema NFT. Fuente: Elaboración propia.	49
Ilustración 20: Esquema del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 6 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.....	53
Ilustración 21: Esquema de la primera sección del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 2 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.	54

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribución de costos para la operación de una planta de OI. Fuente: Adaptado de UNAP (2017).....	12
Gráfico 2: OPEX para tecnologías convencionales de desalinización. Fuente: Brakemeier, D., 2015, en Evaluación económica entre osmosis inversa y desalinización solar térmica, a partir de datos de GWI 2010.	13

1. Introducción

En Latinoamérica las condiciones climáticas, la intervención antropogénica, la falta de disponibilidad de agua y la calidad natural de estas, generan desafíos importantes para el sector agrícola. En particular, para la zona norte de Chile las elevadas concentraciones de boro, cloruro, sólidos disueltos totales, sulfato, entre otros (Vega, et al. 2018), con respecto a la norma sobre los requisitos de calidad del agua para diferentes usos, NCh 1.333, específicamente para el riego, generan una preocupación permanente debido al deterioramiento tanto de los suelos o los cultivos, como también de la salud de las personas para el caso particular del consumo de alimentos regados con aguas contaminadas, por ejemplo, por residuos de la industria ganadera (Cabrera, C., 2018). Es por esto que se han desarrollado diferentes tecnologías que pretenden lograr un tratamiento efectivo, a un bajo costo. Pero, aun cuando existen diferentes alternativas de tratamiento o diferentes métodos de riego, el satisfacer la creciente demanda de alimentos por parte de la población, es cada vez más desafiante, y tanto las personas como el ecosistema se ven afectados por prácticas poco sostenibles. Por otro lado, el desarrollo de la agricultura en condiciones complejas, involucra nuevos factores y desafíos a considerar para lograr una mayor eficiencia, los cuales no solo se relacionan con la cantidad y calidad de las aguas de riego, sino más bien, con la calidad de los suelos, las concentraciones óptimas necesarias para la nutrición de las plantas, las tolerancias de las mismas a ciertos contaminantes, la influencia del clima, o alguna otra variable externa o interna. Por esto, surgen propuestas como la desalinización, que permite utilizar una nueva fuente, y otros procesos de tratamiento para contaminantes específicos como el intercambio iónico o electrodiálisis.

Luego, considerando que Chile cuenta con uno de los mayores porcentajes de cobertura de saneamiento en América Latina y el Caribe, 100% en el sector urbano y 91% en el rural (FAO, 2017), el reúso de las aguas servidas tratadas ofrece una oportunidad para integrarlas como una nueva fuente y aumentar la oferta hídrica en la zona. Para esto, aparte de los sistemas convencionales es posible considerar los sistemas naturales, los cuales aportan en gran medida a la descontaminación de las aguas mediante la fitorremediación (San Miguel Espinosa, 2017), generando un valor ecosistémico, y en algunos casos, recuperación de los suelos.

Reutilizar las aguas servidas tratadas en sistemas de cultivo hidropónicos podría permitir cultivar en ambientes controlados, con una alta eficiencia, y ser un aporte interesante a la problemática de la zona norte debido a su tecnología costo-efectiva. Es necesario destacar que para esto se requieren condiciones especiales, como el aprovechamiento de infraestructura preexistente, cercanía de los sistemas de tratamiento y de cultivo, una regularización efectiva, el aprendizaje por parte de los operadores y

cambios de paradigmas, por lo que solo podría ser una alternativa factible y contundente, si estas condiciones críticas se cumplen.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general es presentar una propuesta factible para el manejo y el tratamiento de aguas para uso agrícola, para ser aplicados en la zona norte de Chile.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabajo tres objetivos específicos, los cuales se detallan a continuación:

1. Encontrar relaciones entre la calidad de las aguas de las distintas fuentes utilizadas por el sector agrícola en la zona norte de Chile y los requerimientos según tipos de cultivos, vale decir, tolerancias, concentraciones de nutrientes requeridos para un crecimiento óptimo, entre otros. Esto, considerando solo los parámetros críticos de la zona norte de Chile.
2. Identificar los métodos de manejo hídrico y los diferentes sistemas de tratamiento convencionales y no convencionales existentes, que puedan ser aplicables a las fuentes de la zona norte del país.
3. Proponer una alternativa para un desarrollo óptimo de la agricultura en la zona norte de Chile.

1.2 Organización del informe

Este trabajo se divide en 7 capítulos que se presentan a continuación:

En el Capítulo 2 del informe se presenta la problemática relacionada con los recursos hídricos en Chile, considerando la calidad del recurso, la cantidad disponible y comentarios respecto al saneamiento y agricultura.

En el Capítulo 3 se describe el contexto hídrico para la zona norte de Chile, considerando aspectos de calidad y cantidad, y para Antofagasta y Coquimbo, se entra en detalle considerando además la participación de estas regiones en el sector silvoagropecuario. Se identifican los contaminantes críticos.

En el Capítulo 4 se discute la relación entre los contaminantes críticos identificados, y los cultivos, identificando el comportamiento de estos en la planta. Se considera tanto la calidad de la solución del suelo, como la del agua de riego. Luego se presentan procesos de tratamiento para remover los contaminantes críticos identificados. Para mayor claridad, se dividen en tratamientos específicos, y desalinización. Para esta última parte, se comparan costos de procesos, eficiencias, consumo energético, y se realizan recomendaciones.

En el Capítulo 5 se presenta el contexto y consideraciones sobre el reúso de aguas residuales como nueva fuente. Se analiza el potencial reúso en Antofagasta y Coquimbo, y se identifican posibles alternativas de tratamiento. En esta parte, se considera la fitorremediación como una alternativa, discutiendo procesos, costos y eficiencia.

En el Capítulo 6 se propone el uso de sistemas de cultivo sin suelo utilizando las aguas servidas tratadas, proporcionando recomendaciones, desafíos, el diseño de un humedal, y el diseño de sistemas de cultivo NFT y de fertirriego para 4 casos.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones finales.

2. El agua en Chile: Situación de cantidad y calidad del recurso hídrico.

Chile es un país perteneciente a Latinoamérica, región del continente americano con gran variedad de ecosistemas, topografías y climas que permiten el desarrollo de diferentes sistemas de producción y de una gran gama de alimentos dependiendo de las condiciones locales, por lo cual, es considerada una superpotencia en términos de biodiversidad y es el mayor exportador neto de alimentos (Hodson de Jaramillo, E., 2018), siendo así, una zona muy interesante y de gran potencial en lo que respecta a la agricultura. Por otro lado, al igual que en otras regiones del mundo, estos sectores no están exentos de las condiciones contraproducentes como la degradación de los suelos, los cada vez más escasos recursos hídricos, y los aumentos en los contaminantes que encontramos en una gran mayoría de los ecosistemas. Es por esto que existe una necesidad de encontrar nuevas soluciones y/o alternativas que permitan disminuir el impacto antropogénico en estos lugares y lidiar con esta problemática de la mejor manera. Para esto, primeramente, se hace un esfuerzo para caracterizar el recurso hídrico en Chile tanto en lo que respecta a su cantidad, como a su calidad.

2.1 Contexto hidrológico de Chile

Chile, en promedio, posee una gran disponibilidad de recursos hídricos, pero también debido a que sus climas van desde los tipos desérticos hasta los esteparios (Fundación Chile, 2018), posee una importante variabilidad del mismo dependiendo la región que se analice, con una baja frecuencia de fenómenos extremos. Esta variabilidad sigue una tendencia de aumento hacia el sur, donde en particular, según los balances hídricos para las aguas superficiales, el mínimo valor se obtiene para el río Los Choros, con un caudal de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, y el máximo en las cuencas costeras de la región de Aysén, con caudales de hasta $3.480 \text{ m}^3/\text{s}$ (FCH, 2018). Por otro lado, a lo largo de todo el país se tiene una distribución de los recursos ineficiente que aumenta la brecha entre zonas privilegiadas y zonas que no, como también importantes diferencias en las precipitaciones, por ejemplo, para la XI región se registran 3.263 mm/año , mientras que en la II región solo 45 mm/año (DGA, 2016, Atlas de agua). Esta brecha será aún más grande por efectos del cambio climático que disminuirán las precipitaciones para fines del siglo XXI en un 20-30% (McPhee et al., 2012), aumentarán las temperaturas, los eventos extremos (Ilustración 1) y las sequías, donde para el año 2016 ya se presentaba un 76% de la superficie del país bajo algún grado de riesgo de “desertificación, degradación de las tierras y sequía”, con un 45% riesgo leve, 22% moderado y 9% grave (Sud-Austral Consulting Spa, 2016). Estas situaciones que alteran el balance oferta y demanda, afectan tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas, generando, por ejemplo, que la recarga de 110 acuíferos del país sea superada por la demanda (Velasco J., 2017)

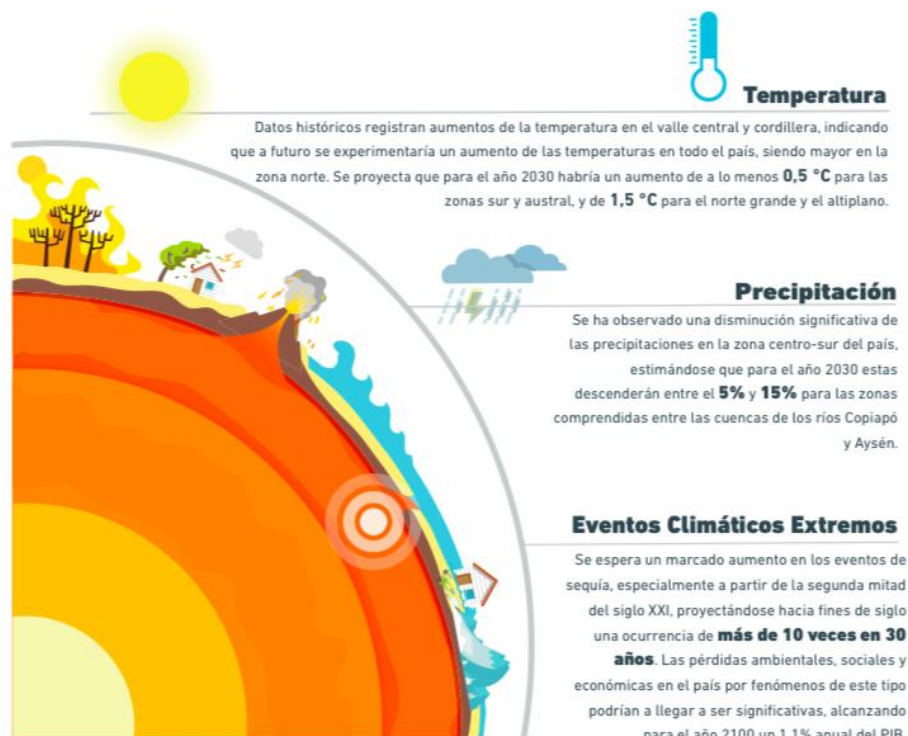


Ilustración 1: Efectos del cambio climático en Chile. Fuente: FCH, 2018.

Luego, aun cuando existen estas condiciones adversas, Chile genera importante porcentaje de su producto interno bruto gracias a actividades que dependen del agua, en particular, un 3% de este es generado por actividades del sector silvoagropecuario (Banco Central Chile, 2018), el cual considera el forestal, agrario y ganadero, y abarca un 9,4% del total de las empresas de Chile (Quinta Encuesta Longitudinal de Empresas, 2019).

Con respecto a la distribución de la oferta de aguas subterráneas y superficiales, en la Ilustración 2 se observan las ofertas proyectadas para el año 2030 (Vargas, 2017), donde se percibe en color blanco una clara falta de información sobre las ofertas de los acuíferos y, en color azul claro, una baja oferta de aguas superficiales en la zona norte. Luego en la Tabla 1, se observan los valores de caudales demandados a lo largo de Chile, representados por la huella hídrica (HH) azul (demanda por extracciones sin retorno a la cuenca de aguas superficiales y subterráneas), y por la HH verde (consumo de agua lluvia por el sector forestal o agrícola). Debido a lo anterior, cuencas como Río Los Choros, Río Limarí, Río Copiapó, Río Lluta, Elqui, Choapa, Salado, Salar de Atacama, Río Quilimarí, entre otras, poseen un elevado valor en su brecha hídrica, la cual representa el porcentaje del consumo hídrico con respecto a la oferta de la cuenca.

Finalmente, es posible determinar que la condición actual y futura de algunos territorios, ya sea por exceso de demanda, o déficit de oferta, están en cierta medida sujetas a las decisiones futuras sobre el consumo de agua, y si no se toman las medidas correspondientes, por la falta de información, políticas públicas deficientes, o alguna otra razón, el escenario podría complicarse aún más.

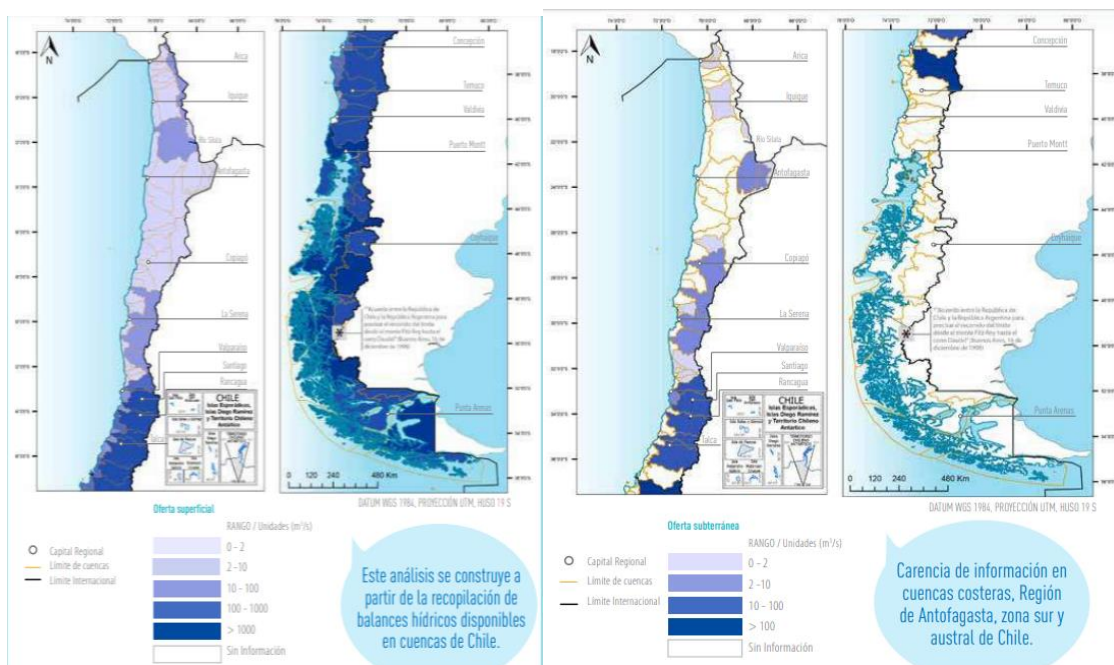


Ilustración 2: Oferta referencial para aguas superficiales y subterráneas. Escenarios Hídricos 2030, basado en Vargas, 2017.

Tabla 1: Demanda (Consumo HH azul) de agua según Macrozona. Elaboración propia a partir de Escenarios hídricos 2030.

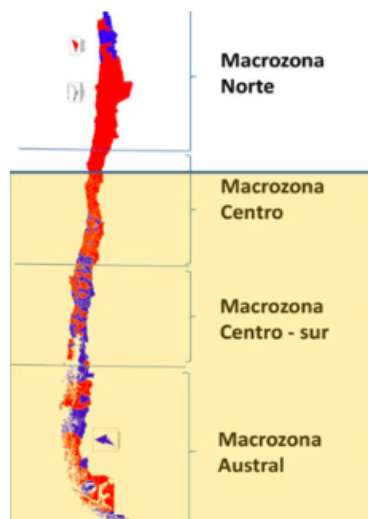
Macrozonas	Captación [m ³ /s]	Devolución [m ³ /s]	Consumo HH azul [m ³ /s]	Consumo HH verde [m ³ /s]
Norte	60,05	22,86	37,19	1,16
Centro	865,55	709,04	156,51	124,63
Sur	898,67	881,33	17,34	310,65
Austral	1,44	0,75	0,68	0,89

Consumo HH azul: Volumen de agua extraído de fuentes subterráneas o superficiales sin retorno a la cuenca, o con retorno en un tiempo distinto al que se extrajo. Este valor representa la demanda consuntiva del sector.

Consumo HH verde: Volumen de agua lluvia que es utilizada para riego en el sector forestal o agrícola. Esta queda temporalmente almacenada en la parte superior del suelo o vegetación, por lo que se puede evaporar, evapotranspirar, o incorporar en la vegetación.

2.2 Calidad del recurso en Chile

Para poder caracterizar las aguas de Chile de manera general, es necesario hacerlo según la fuente y el sector al cual pertenece. Para esto, se definen Macrozonas que contienen distintas regiones adyacentes. De esta manera, la Macrozona Norte integra las regiones XV, I, II, III, IV, la Macrozona Centro integra las regiones V, RM, VI, VII, la Macrozona Sur integra las regiones VIII, IX, XIV, X, y la Macrozona Austral integra las regiones XI y XII (Pastén, P. et al., 2019). Su distribución se observa en la Ilustración 3.



- **Macrozona Norte:**
 - Región de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo.
- **Macrozona Centro:**
 - Región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.
- **Macrozona Sur:**
 - Región de Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
- **Macrozona Austral:**
 - Región de Aysén y Magallanes

Ilustración 3: Distribución de Macrozonas en Chile. Fuente: Adaptado de MOP (2017).

Para el caso de las aguas superficiales, estas poseen valores de pH que varían entre 6.5 y 8.5, con dos excepciones en las cuencas del río Lluta, y Elqui, donde en la primera el río Azufre posee elevadas concentraciones de metales, metaloides, sales, y presenta un pH muy ácido en su origen debido a la presencia del Volcán Tocora y la Azufrera Tocora, pero ocurren dos eventos que aportan al mejoramiento de su calidad, primeramente un proceso hidrogeoquímico que ocurre gracias a humedales y bacterias, y luego una confluencia con el río Caracarani; y en la segunda (Elqui), se presentan problemas de calidad con respecto al pH, arsénico, entre otros, en zona minera de El Indio, lo cual se normaliza aguas abajo. Por otro lado, los enriquecimientos minerales son elevados en la Macrozona Norte y Centro, pero, como consecuencia de que las condiciones hidrológicas se comportan de manera favorable para la zona centro (existe menos evaporación y una mayor precipitación), solo la zona Norte posee, en general, valores elevados de conductividad eléctrica (CE), y en algunas cuencas, concentraciones moderadamente altas de boro, sulfato, y metales pesados como arsénico, cobre, entre otros. Es necesario destacar que la Macrozona Norte se ve afectada por una gran evaporación, drenajes ácidos, afloramientos de aguas subterráneas salobres, y aportes naturales y antropogénicos de metales y metaloides.

Hacia el sur, los aportes de aguas subterráneas salobres disminuyen, la esorrentía pluvial y nival aumentan, por lo que la conductividad eléctrica disminuye llegando a valores excepcionalmente bajos para las Macrozonas Sur y Austral. Por otro lado, los valores para el nitrato son mayores en la Macrozona Norte y Centro, y para el sur, disminuyen.

Para las aguas subterráneas, la CE presenta una tendencia decreciente de norte a sur, al igual que el boro y el cloruro. El arsénico está presente de manera general en las Macrozonas Norte y Centro. El nitrato y las sales disueltas totales están presentes en casi todas las Macrozonas, pero en la Norte, se encuentran como consecuencia del contacto con formaciones geológicas y ambientes hidrológicos áridos, mientras que para la Centro y Sur se asocia a la contaminación urbana y agrícola difusa. La Macrozona Norte, además, posee una alta concentración de sulfato.

Luego, los parámetros de calidad para Chile se regulan a partir de diversas normas de agua. Para el caso particular de esta memoria, se detallan los aspectos más importantes de la norma chilena 1333, la cual hace referencia a la norma de calidad de agua para diferentes usos, incluido el riego.

En una primera instancia, se muestran en la Tabla 2 los límites máximos de concentraciones de los elementos químicos en el agua para riego normados en la misma, además del valor límite definido con respecto al porcentaje relativo de sodio presente en el agua (35%), que se determina a partir de la razón entre la concentración de sodio y los otros cationes presentes. Luego, en la Tabla 3 se detallan las categorías según la salinidad y su efecto en las plantas (clasificada por su conductividad específica o la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT), y finalmente, se realizan algunos comentarios con respecto a los pesticidas y los requisitos bacteriológicos para poder determinar si la calidad del agua es apta o no para su uso en riego. Es necesario comentar que la autoridad competente, el MOP, en algunos casos puede autorizar límites menores o mayores mediante una resolución fundada.

Tabla 2: Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: NCh 1.333of78.

Elemento	Fórmula	Unidad	Límite máximo
Aluminio	(Al)	mg/l	5,00
Arsénico	(As)	mg/l	0,10
Bario	(Ba)	mg/l	4,00
Berilio	(Be)	mg/l	0,10
Boro	(B)	mg/l	0,75
Cadmio	(Cd)	mg/l	0,010
Cianuro	(CN-)	mg/l	0,20
Cloruro	(Cl-)	mg/l	200,00
Cobalto	(Co)	mg/l	0,050
Cobre	(Cu)	mg/l	0,20
Cromo*	(Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro	(F)	mg/l	1,0
Hierro	(Fe)	mg/l	5,0
Litio	(Li)	mg/l	2,50
Litio (cítricos)	(Li)	mg/l	0,075
Manganeso	(Mn)	mg/l	0,20
Mercurio	(Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno	(Mo)	mg/l	0,010
Níquel	(Ni)	mg/l	0,20
Plata	(Ag)	mg/l	0,20
Plomo	(Pb)	mg/l	5,0
Selenio	(Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual**	(Na%)	%	35,00
Sulfato	(SO ₄₋₂)	mg/l	250,00
Vanadio	(V)	mg/l	0,10
Zinc	(Zn)	mg/l	2,00

* Las aguas destinadas a regadío de verduras a ras del suelo y que habitualmente se consumen crudas, deben considerar un requisito de 0.1 mg/l de Cromo.

** Para el cálculo del sodio porcentual, se considera la siguiente fórmula, la cual hace referencia a la relación entre la concentración de este elemento, y la suma de los cationes presentes en el agua: $Na\% = \left(\frac{Na}{(Na+Ca+Mg+K)} \right) * 100$

Tabla 3: Clasificación de las aguas de riego según su salinidad. Fuente: NCh 1333.of78.

Clasificación	Conductividad Especifica, c , μ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, s , mg/l a 105 °C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1.500$	$500 < s \leq 1.000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1.500 < c \leq 3.000$	$1.000 < s \leq 2.000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3.000 < c \leq 7.500$	$2.000 < s \leq 5.000$

Con respecto a los pesticidas, se detalla que para los herbicidas la autoridad competente debe pronunciarse para cada caso, y se considera que los insecticidas no perjudican las aguas de riego, por lo que no tienen límite máximo. El rango de pH requerido es entre 5,5 y 9, el contenido de coliformes fecales en las aguas para riego de frutas y verduras que crezcan a ras del suelo, y que se habitualmente se consumen crudas debe ser menor o igual a 1.000 NMP cada 100 mililitros, y finalmente, la autoridad competente establece un valor para la Razón de Adsorción de Sodio (RAS). Con respecto a esto último, se realizan algunos comentarios en la sección 4.1.

3. Situación hídrica de la zona norte de Chile, una mirada enfocada en la agricultura para la región de Antofagasta y Coquimbo.

En la zona norte del país, dependiendo de la región, se encuentran climas secos, desérticos y semiáridos. En las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo, se encuentran los acuíferos y cuencas con menor oferta de aguas subterráneas y superficiales del país. Los valores mínimos oscilan entre los 0,01 y 1,11 m³/s para ríos como Los Choros y San José respectivamente, y valores máximos entre los 9,18 y 11,78 m³/s para las cuencas altiplánicas y el río Huasco respectivamente (FCH, 2018).

Con respecto a las precipitaciones, en la zona norte llueve en promedio solo un 6% de la media nacional anual. Luego, si se comparan las Macrozonas entre sí, la diferencia es aún mayor. En la Tabla 4 se observa la diferencia entre las precipitaciones de las zonas norte, centro, sur, y austral, considerando el promedio ponderado con sus respectivas áreas.

Tabla 4: Precipitación media anual en función de las Macrozonas. Fuente: DGA (2016).

Macrozona	Precipitación	[mm/año] ⁽²⁾
Norte		87
Centro		943
Sur		2.420
Austral		2.963
	Promedio Chile ⁽¹⁾	1.525

(1): Corresponde al promedio ponderado con el área de cada región

(2): Promedio ponderado con el área de cada región que pertenece a la macrozona

En la zona norte existe una gran cantidad de acuíferos. Algunos de los más importantes serían, el Pampa del Tamarugal en la región de Iquique, Río Salado en Atacama, Sierra Gorda en Antofagasta, Elqui en Coquimbo, entre otros, los cuales en cierta medida aportan a la oferta total de recurso hídrico de sus regiones respectivamente. En algunos casos, como lo son en la región de Antofagasta y Coquimbo, se observan problemas de calidad en ciertos puntos de medición (DGA, 2017; CNR, 2017), y de disminución en sus niveles de pozos (FCH, 2018).

Por otro lado, diversos estudios realizados por la DGA y la CNR en la zona norte, detectan ambientes poco favorables para el crecimiento de algunos cultivos debido a las altas concentraciones de cloruro, boro, arsénico, entre otros, con respecto a la NCh 1.333 (DGA, 2017; DGA, 2016; CNR, 2017). Lo anterior preocupa a las autoridades y, en particular, a los agricultores que pretenden satisfacer de la mejor manera los requerimientos de sus cultivos.

Considerando el contexto de la zona norte, en la siguiente sección se presenta información relevante de la región de Antofagasta y Coquimbo.

3.1 Región de Antofagasta

La región de Antofagasta posee un clima árido con escasez hidrográfica y de vegetación. Se caracteriza por tener solo un río que desemboca al mar, el río Loa, por lo que este es su principal fuente de recurso hídrico. Por otro lado, también posee un aporte importante por el río San Pedro y el Salado. Las características principales de estos ríos se observan en las Tablas 5, 6 y 7, donde el máximo caudal medio anual medido se encuentra en la estación Río Loa en Escorial, con 3.91 m³/s.

Tabla 5: Características principales del Río Loa. Fuente: DGA (2016)

Río	Cuenca	Área Cuenca [km ²]	Longitud Cause [km]	Estación Fluviométrica	Caudal Medio Anual [m ³ /s]
Loa	Río Loa	33.081	440	Río Loa en desembocadura	0,3
Loa	Río Loa	33.081	440	Río Loa antes de Represa Lequena	0,6
Loa	Río Loa	33.081	440	Río Loa en Chacance	0,9
Loa	Río Loa	33.081	440	Río Loa en Finca	0,7

Tabla 6: Caudales característicos en cuenca Río Loa. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017

Río	Nombre estación	Caudal mínimo [m ³ /s]	Caudal medio [m ³ /s]	Caudal máximo [m ³ /s]
Loa	Río Loa salida Conchi	0,33	0,6	1,72
Loa	Río Loa en Escorial	1,18	1,57	3,91
San Pedro	Río San Pedro Parshall n°2	0,89	1,06	1,13
Salado	Río Salado en sifón Ayquina	1,63	0,67	0,38
Toconce	Río Toconce antes represa sendos	0,32	0,51	0,94

Tabla 7: Caudales característicos en cuenca Salar de Atacama. Fuente: AMPHOS & CNR, 2017.

Río	Nombre estación	Caudal mínimo [m ³ /s]	Caudal medio [m ³ /s]	Caudal máximo [m ³ /s]
Vilama	Canal Vilama en Vilama	0,081	0,1	0,13
San Pedro	Río San Pedro en Cuchabrache	0,55	0,77	2,01

Los acuíferos más importantes de la región son el acuífero Salar de Atacama, Salar de Llamara (se comparte entre la primera y segunda región), el Salar Elvira-Laguna Seca, Inacaliri, y Sierra Gorda. Es necesario destacar que existe una parte del acuífero Quebrada Pan de Azúcar de la región de Atacama que se comparte con la región de Antofagasta. Para más claridad, en la Ilustración 4 se observa un mapa físico de la región y la distribución de los acuíferos.

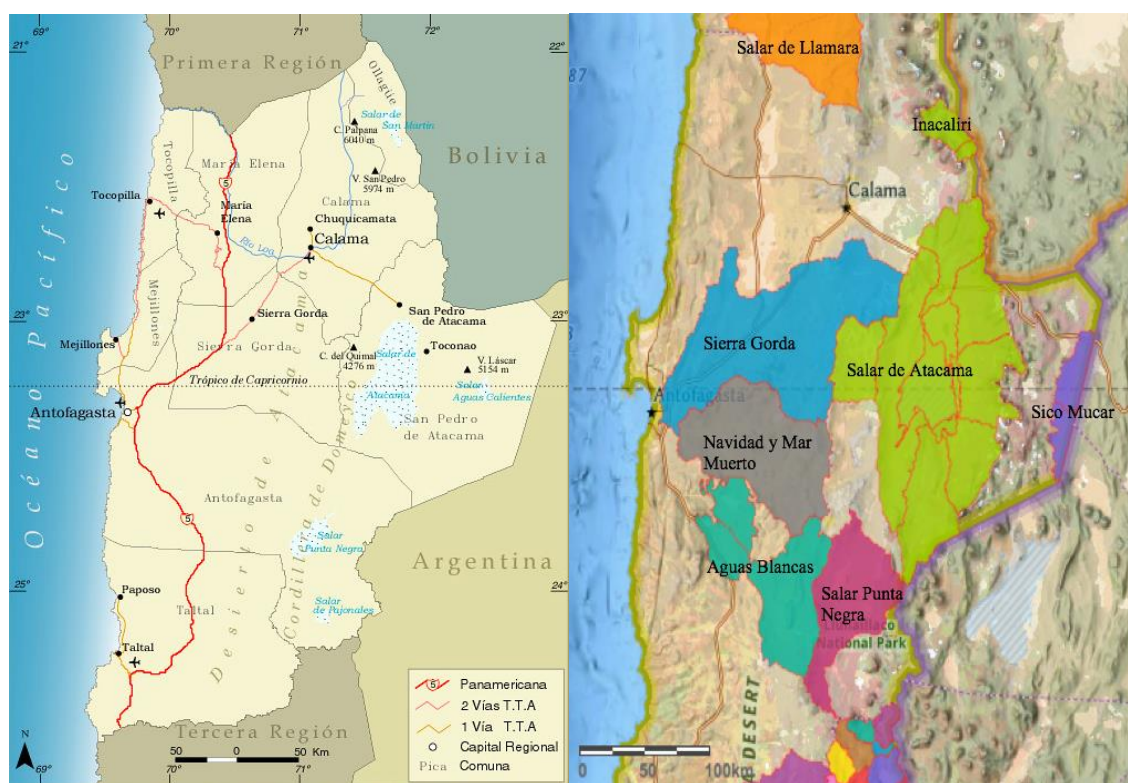


Ilustración 4: Mapa físico de la región de Antofagasta y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.).

El sector económico que más consume agua en la región es el minero (57%), luego, el segundo más importante es el agrícola, sector que consume alrededor de un 17% de la demanda total, y se estima que el porcentaje relativo con respecto al total aumentara sutilmente para el año 2030 y el 2040, donde para el año 2030, el sector consumirá un 18% de la demanda total, y para el 2040, un 18,6%. En general, la demanda agrícola se concentra en la cuenca del Salar de Atacama, y en la cuenca el Río Loa, con valores aproximados de 33,5 millones de m³/año y 16,1 millones de m³/año respectivamente (DGA, 2012). Los valores por cada sector se observan en la Tabla 8.

Tabla 8: Resumen de demandas hídricas en miles de metros cúbicos por año, para la región de Antofagasta en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	38.705	44.480	49.085
Agua Potable Rural	481	569	577
Agrícola	46.230	42.315	42.395
Pecuario	102	146	177
Minero	151.072	99.566	75.990
Industrial	29.563	48.836	59.700
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	266.153	235.912	227.924
Acuícola	0	0	0
Generación Eléctrica	5.397	8.353	8.790
TOTAL NO CONSUNTIVO	5.397	8.353	8.790
Secano	4.879.423	5.282.348	5.281.119
Forestal (Productivo)	1.347	1.374	1.376
Forestal (No Productivo)	372.537	372.550	372.551
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	5.253.307	5.656.272	5.655.045

Por otro lado, si bien la actividad agrícola es importante en la región, utilizando un 17% del total de los derechos consuntivos, la región enfrenta una falta de disponibilidad hídrica, el monitoreo registra una disminución progresiva en los caudales disponibles (CNR, 2017), y la presencia de contaminantes de origen natural y antropogénicos afectan negativamente el área actual y potencial de cultivo de la zona. Un claro ejemplo de esto se observa en particular en la Tabla 9, donde en la cuenca del Río Loa, los valores promedios del arsénico, boro, cloruro y sulfato, se presentan en algunas estaciones en concentraciones por sobre la norma de riego.

Tabla 9: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca del río Loa, Antofagasta. Adaptado DGA (2016)

Estación	Arsénico	Boro	Cloruro	Sulfato
Río Loa en represa Lequena	0,22	4,46	140,5	193
Río Loa antes junta río Salado	0,24	6,52	564,9	161,4
Río Loa en Yalquincha	1,04	13,26	1.778,6	222,4
Río Loa en Finca	1,55	16,9	2.481	456,4
Río Loa antes junta San Salvador	1,03	19,15	2.117,9	259,4
Río Loa en Quillagua	-	28,9	2.806,3	-
Canal Quillagua en Quillagua	2,65	35,14	3.833,5	692,7
Río Loa en desembocadura	1,66	36,4	6.109,6	2.099
Valor NCh 1.333 (mg/L)	0,1	0,75	200	250

Lo mismo ocurre para la cuenca Salar de Atacama. Las concentraciones promedio se observan en la Tabla 10:

Tabla 10: Concentraciones promedio de arsénico, boro, cloruro y sulfato, en estaciones de la cuenca Salar de Atacama. Adaptado DGA (2016).

Estación	Arsénico	Boro	Cloruro	Sulfato
Río Puritama en Huatin (CA)	0,35	8,8	519	206,3
Canal Vilama en Vilama	0,519	10,69	558,4	340,4
Río San Pedro en Cuchabrachi	0,217	2,14	740,1	309,2
Canal Cuno en Socaire	0,347	2,07	113,7	288,1
Canal Tilomonte antes represa	0,088	9,41	1583,7	649,6
Canal Aguas Blancas	2,889	19,4	327,6	224,7
Valor NCh 1.333 (mg/L)	0,1	0,75	200	250

Debido a que las concentraciones de boro, arsénico, cloruro y sulfato, medidas en las estaciones de la cuenca del Río Loa y Salar de Atacama son elevadas, desde este punto se identificarán como contaminantes críticos para la región.

Antofagasta posee una gran heterogeneidad en lo que respecta a su distribución, pudiendo encontrar zonas donde la calidad cumple con las concentraciones y los requerimientos de la norma, como por ejemplo las únicas dos vertientes de la parte alta de la cuenca de Ascotán, o el río Zapaleri, y por otro lado, se encuentran fuentes las cuales poseen una calidad inaceptable, por ejemplo, en el salar de Alconcha, donde en las aguas subterráneas se supera la norma de riego en 3 veces con respecto al boro, y contiene altas concentraciones de arsénico. En general, la calidad de las aguas cumple con la tendencia de ser de mejor calidad en el sector altiplánico fronterizo, de calidad regular en el sector precordillerano del Salar de Atacama y el sector alto del río Loa, y de una mala calidad en la parte baja del mismo, en la confluencia con el río Salado

Dada esta variabilidad en calidad, en la Ilustración 5 se muestra un mapa resumen de la región, con la calidad las fuentes más importantes. Es necesario comentar que debido a los cambios veloces que ocurren en las distintas cuencas de Chile, los valores de cantidad y calidad varían constantemente.

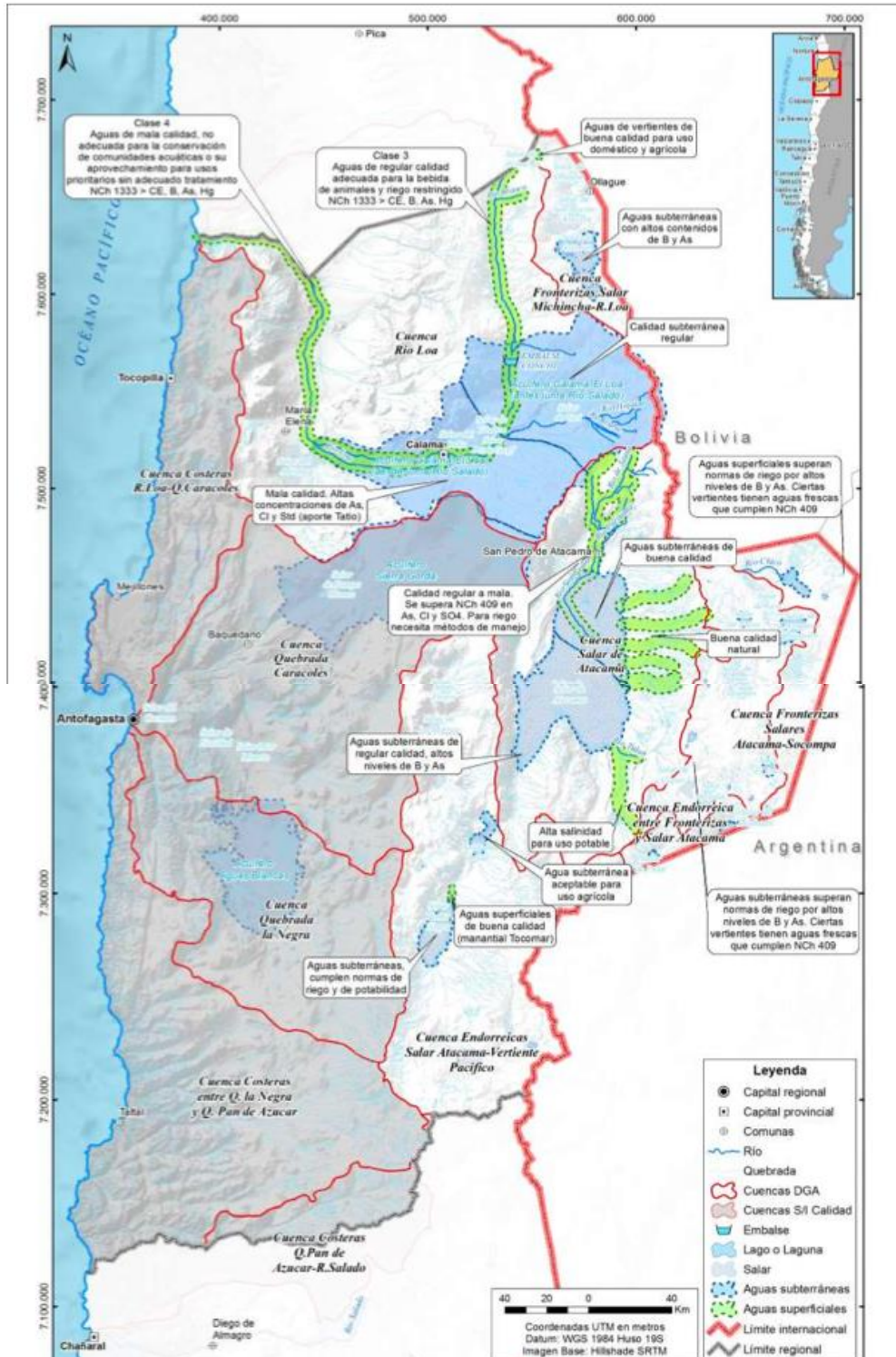


Ilustración 5: Mapa resumen de la calidad de las fuentes de la región de Antofagasta. Fuente: DGA, 2016.

3.2 Región de Coquimbo

Esta región posee 3 valles transversales importantes: Elqui, Limarí, y Choapa, valles en donde se practica la agricultura y que presentan una tasa creciente en la demanda hídrica. Las principales características de estos valles se muestran en la Tabla 11:

Tabla 11: Características de los principales ríos en la región de Coquimbo. Fuente: DGA (2016)

Río	Cuenca	Área Cuenca [km ²]	Longitud Cauce [km]	Estación Fluviométrica	Caudal Medio Anual [m ³ /s]
Elqui	Río Elqui	9.825	80	Río Elqui en Algarrobal	11,2
Limarí	Río Limarí	11.696	60	Río Grande en las Ramadas	4,2
Choapa	Río Choapa	7.653	143	Río Choapa en Cuncumén	9,6

Además, los principales acuíferos de la región son el Elqui, Los Choros, Culebrón-Lagunillas, Limarí, Choapa y Quilimarí. El acuífero Huasco es compartido entre la región de Atacama y Coquimbo. Para más claridad, en la Ilustración 6 se observa un mapa físico de la región y la distribución de los acuíferos.

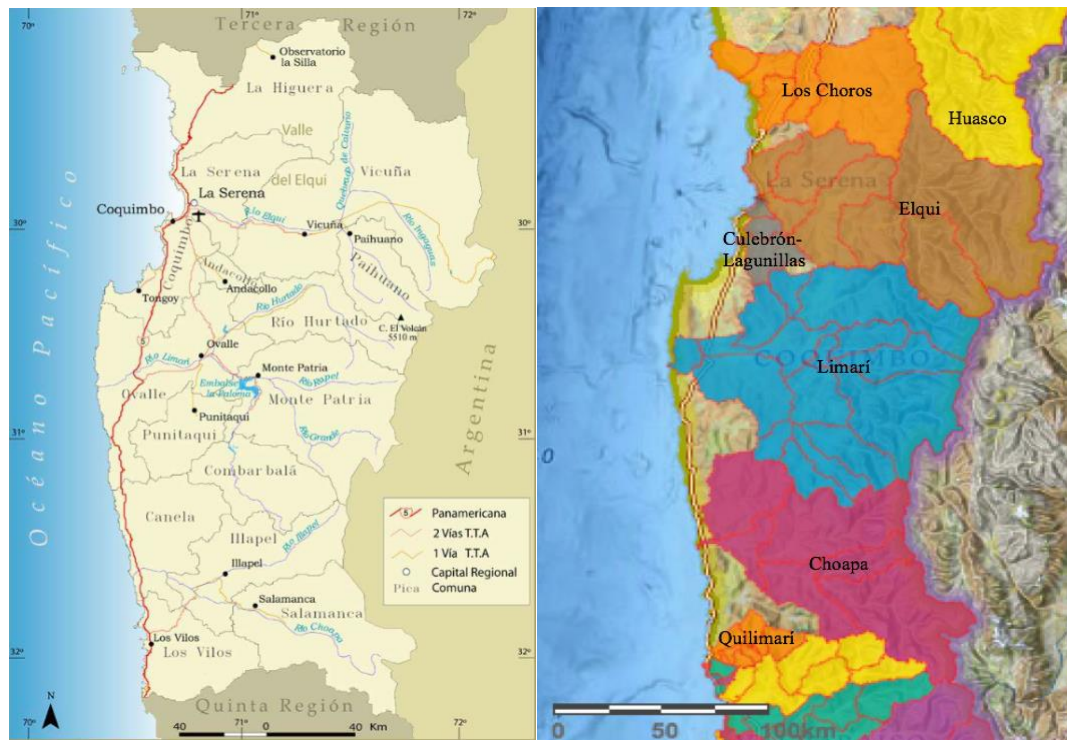


Ilustración 6: Mapa físico de la región de Coquimbo y sus acuíferos. Fuente: BCN (2007), DGA (s.f.).

Coquimbo posee 8 embalses, donde los más importantes son el Paloma, Puclaro, Cogotí y Recoleta, todos para riego. En la región se estima que las precipitaciones durante el siglo XX disminuyeron un 30%, además existieron eventos de sequías periódicas, y, para el año 2015, se registró un déficit en las precipitaciones y en la acumulación de nieve. Estos eventos se tradujeron en una disminución en los caudales superficiales en un 60%, generando para el año 2015 que los embalses monitoreados

almacenaran solo un 4% de su capacidad total (DGA, 2015). Finalmente, las intensas lluvias en el año 2017 permitieron almacenar hasta un 85% de su capacidad, pero este valor ha ido disminuyendo con el tiempo (DGA, 2019), dada la falta de precipitaciones.

En la zona, aun cuando existe evidencia de que el escenario hídrico futuro es preocupante, aproximadamente un 80% del consumo hídrico está relacionado con el sector agropecuario (DGA, 2015). Además, el Gobierno Regional indica que no existe una solución permanente para la distribución de agua para uso doméstico debido a la lejanía de los sectores rurales, por lo que se utilizan camiones aljibes para satisfacer esta demanda (FCH, 2018).

Para lograr comprender la importancia de este sector económico en la región, se observa en la Tabla 12 un resumen de las demandas hídricas de la misma (DGA, 2017), donde es posible comparar, por ejemplo, que para el año 2015, un 83% de la demanda está relacionada con el sector agrícola, y que solo alrededor de un 8% para el sector minero, considerando los usos consuntivos. Esta diferencia es aún mayor cuando se analiza para la proyección de los años 2030 y 2040.

Tabla 12: Resumen de demandas hídricas para la región de Coquimbo en función de los diferentes usos. Fuente: DGA, 2017.

	Demanda (Mm ³ /año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	39.496	47.667	52.123
Agua Potable Rural	6.214	7.230	7.505
Agrícola	462.090	720.118	790.984
Pecuario	1.470	2.664	3.198
Minero	41.967	46.021	40.900
Industrial	4.742	6.629	8.034
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	555.979	830.328	902.744
Acuícola	154	556	211
Generación Eléctrica	189.100	214.735	229.268
TOTAL NO CONSUNTIVO	189.254	215.290	229.479
Secano	25.783.317	25.666.796	25.166.147
Forestal (Productivo)	29.543	34.288	36.654
Forestal (No Productivo)	343.960	339.922	339.965
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	26.156.819	26.041.006	25.542.766

Con respecto a la calidad que poseen sus diversas fuentes de agua, considerando su concentración de elementos químicos, y como estos se relacionan con las normas que aplican, se muestran en la Tabla 13, para los ríos principales de la región, el Elqui, Limarí y Los Choros, los valores promedios históricos de 21 años de las concentraciones del sulfato y algunos metales considerados abundantes en la zona. Se observa que, para los elementos arsénico, cobre, mercurio, cadmio, molibdeno y para el sulfato, en algunos ríos, sus concentraciones promedio históricos exceden la NCh 1.333.

Tabla 13: Valores de parámetros de calidad para los principales ríos de la región de Coquimbo. Fuente: Pastén et al. (2018).

Ríos	As (µg/L)	Cu (µg/L)	Cr (µg/L)	Hg (µg/L)	Cd (µg/L)	Mo (µg/L)	Pb (µg/L)	SO ₄₋₂ (mg/L)
Los Choros	175,6	ND	60	817	ND	60	817	175,7
Elqui	1.705	6.082	26	3	28	70	147	445,7
Limarí	6	41	30	3	35	60	60	77,1
NCh1333.Of78	100	200	100	1	10	10	5.000	250

Con respecto a los acuíferos de la región, se muestran en las Tablas 14 y 15, los valores promedios para algunos parámetros de interés.

Tabla 14: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017).

Acuíferos	Promedio Sulfato (mg/L)	Promedio Cloruro (mg/L)	Promedio SDT (mg/L)	Promedio Hierro (mg/L)	Promedio Manganeso (mg/L)
Los Choros	227,6	210,5	826,3	0,283	0,008
Elqui	237,8	63,2	643,1	0,461	0,021
Culebrón Lagunillas	161,1	66,5	678	< 0,02	< 0,01
Limarí	152,5	140	703,3	0,409	0,049
Choapa	72,1	35,8	329,2	0,392	0,069
Quilimarí	76,3	74	430,3	0,21	0,067
NCh 1333	250	200	En Tabla 5	5	0,2

Tabla 15: Resumen de calidad de agua para los principales acuíferos de la región de Coquimbo. Adaptado de DGA (2017) (continuación).

Acuíferos	Promedio Sodio (mg/L)	Promedio Calcio (mg/L)	Promedio Magnesio (mg/L)	Promedio Potasio (mg/L)	Promedio Sodio Porcentual
Los Choros	157,2	108,1	30,6	3,7	52,5%
Elqui	73,2	107,7	23	2,9	35,4%
Culebrón Lagunillas	133,6	45,2	29,3	2,4	63,5%
Limarí	89,3	94,8	33,1	2,7	40,6%
Choapa	42,1	53,3	15,6	1,6	37,4%
Quilimarí	57,6	60,7	29,1	1,9	38,6%
NCh 1333	Según criterio de Na% = $\left(\frac{Na}{(Na+Ca+Mg+K)}\right) * 100$				35%

Debido a que las concentraciones de sulfato, cloruro, Na% y en algunos casos SDT, medidas en los principales acuíferos son elevadas, desde este punto se identificarán como contaminantes críticos para la región.

3.3 La situación del sector agrícola en la región de Antofagasta y Coquimbo.

El sector agrícola en la región de Antofagasta y Coquimbo consume respectivamente un 17% y un 83% de la demanda consuntiva total. Además, según lo indicado en la Tabla 16, Antofagasta posee aproximadamente 1.814 hectáreas cultivadas, las cuales se concentran en la Provincia de El Loa (1.772,8 ha), y en menor medida en Antofagasta (32,4 ha) y Tocopilla (8,9 ha). Para Coquimbo, se registran 146.000 ha, distribuidas entre las Provincias de Elqui (38.849 ha), Choapa (45.043 ha) y Limarí (61.781 ha). Ambas regiones tienen una tendencia al cultivo de plantas forrajeras, pero también existen superficies cultivadas con frutales, hortalizas, cereales, parronales, entre otros. Es necesario tener en cuenta que la superficie plantada no necesariamente es la misma que la superficie regada.

Por otro lado, según la Tabla 17, Antofagasta riega un 93,24% de sus cultivos mediante el riego por tendido, mientras que Coquimbo utiliza como principal método de riego, el riego por goteo, seguido por tendido y surco. La información utilizada corresponde al último censo agropecuario del año 2007, por lo que es altamente probable que, para el próximo censo, sean mayores las hectáreas con riego tecnificado.

Tabla 16: Superficie plantada y porcentaje según tipo de cultivo para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).

	Superficie Antofagasta (ha)	Superficie Coquimbo (ha)	Porcentaje del total Antofagasta	Porcentaje del total Coquimbo
Cereales	185,7	3.058,2	10,2%	2,1%
Leguminosas y tubérculos	4,5	3.552,0	0,2%	2,4%
Cultivos industriales	0,2	401,4	0,0%	0,3%
Hortalizas	349,7	11.399,4	19,3%	7,8%
Flores	4,6	403,4	0,3%	0,3%
Plantas forrajeras	1.096,9	82.749,1	60,5%	56,8%
Frutales	152,3	31.740,1	8,4%	21,8%
Viñas y parronales viníferos	6,0	12.200,8	0,3%	8,4%
Viveros	0,8	52,2	0,0%	0,0%
Semilleros	13,4	116,9	0,7%	0,1%
Total	1.814,1	145.673,4		

Tabla 17: Superficie regada y su porcentaje con respecto al total, según tipo de sistema de riego para la región de Antofagasta y Coquimbo. Fuente: INE (2007).

Tipo de riego	Superficie en Antofagasta (he)	Superficie en Coquimbo (he)	Porcentaje del total Antofagasta	Porcentaje del total Coquimbo
Tendido	2.144,57	19.484,71	93,42%	25,74%
Surco	34,89	18.159,88	1,52%	23,99%
Otro tradicional	70,94	786,92	3,09%	1,04%
Aspersión tradicional	26,75	273,05	1,17%	0,36%
Carrete o pivote	0,18	897,9	0,01%	1,19%
Goteo y cinta	17,71	35.008,48	0,77%	46,24%
Microaspersión/microjet	0,6	1.097,68	0,03%	1,45%
Total	2.295,64	75.708,62		

Tanto en la región de Antofagasta como la de Coquimbo se destina una gran cantidad de agua al sector agrícola, por esto, las escasas precipitaciones durante los últimos años, el vaciamiento continuo de embalses, la mala calidad de los sistemas de conducción, las elevadas concentraciones de elementos como el boro, sulfato, cloruro, arsénico, SDT, valor de Na% en algunos puntos de muestreo, y la falta de información, hacen necesario encontrar nuevas y mejores medidas para el manejo del recurso. Para lograr esto, primeramente, es necesario comprender como interactúan los contaminantes críticos de ambas regiones con las plantas, el suelo, y cómo se remueven si es que es necesario. Dado que el sulfato, cloruro y el arsénico se encuentran como parámetros críticos en ambas regiones, en la siguiente sección se analizan en detalle. Además, debido a la importancia del boro en Antofagasta y de los SDT y Na% en Coquimbo, también se agregan al análisis bajo el concepto de salinidad y sodicidad.

4. La relación entre los contaminantes críticos y la agricultura.

Los contaminantes de mayor relevancia para las regiones de Antofagasta y Coquimbo son el boro, sulfato, cloruro, arsénico, y finalmente por implicancia, la salinidad. Dada la importancia de estos elementos en el agua, suelo y cultivos, se realiza una caracterización de cada uno de ellos según sus atributos más relevantes, su efecto en las plantas, y las alternativas existentes para su remoción.

Estos elementos o compuestos, pueden tener concentraciones diferentes dependiendo de si son medidos en el agua de riego, o en el agua que está en contacto con el suelo, la cual genera una solución de suelo. Es importante hacer la diferencia, ya que una calidad óptima en el agua de riego no asegura que la calidad de la solución del suelo lo sea.

En particular, Antofagasta contiene en la mayor parte de su superficie un alto contenido de sales, donde en el altiplano, existen cuencas endorreicas y salares ricos en calcio y sulfato, en la zona intermedia se registran elevadas concentraciones de sales, carbonatos y sílices, y en zona costera, se registra un alto contenido de sodio. En los suelos de la región se registran pH entre 8 y 9.2, en particular, entre 8.4 y 9.2 en el sector costero, mayor a 8 en la zona desértica, y entre 8.5 y 8.9 en el sector altiplánico (CNR, 2017). Luego, en Coquimbo se encuentra presencia de suelos pardo-cálcicos, ardisoles, entre otros (DGA, 2017), los cuales tienen problemas de fertilidad y exceso de salinidad, pero si son regados, pueden permitir el crecimiento de cultivos. Debido a esto, la región posee una importante cantidad de hectáreas plantadas, pero tiende a acumular sales producto de la fertilización.

4.1 El rol del suelo en la agricultura.

Los cultivos necesitan una cierta cantidad y calidad de agua de riego para poder nutrirse de la mejor manera posible, pero cuando esta entra en contacto con el suelo se genera una solución, la cual es la que realmente interactúa con las raíces de la planta y la que finalmente esta utiliza para crecer. Es por esto que es importante estudiar las propiedades del suelo y como este se relaciona con el agua de riego.

Las plantas de alguna u otra manera se comportan como una bomba succionadora de agua en el suelo, la cual funciona a partir del principio de presión osmótica, o similar, el principio de potencial hídrico (o químico). Ambos principios determinan el flujo del agua frente a una diferencia de potencial o presión, donde el flujo va desde un mayor potencial a uno de menor potencial, e inversamente, desde una menor presión osmótica a una mayor. Los cultivos absorben agua y nutrientes mediante estas diferencias entre la solución del suelo y la planta, gracias a que esta última es capaz de controlar, dentro de ciertos límites, su presión osmótica interna, pudiendo así aumentarla para que exista flujo desde el suelo hacia la raíz. Este efecto es influenciado por el contenido de agua en el suelo, la evapotranspiración, la presencia de contaminantes o nutrientes en el medio, entre otros factores, donde un aumento en la evapotranspiración o un aumento en el aporte de sales, aumentan la presión osmótica debido al incremento en la concentración, y hace que sea cada vez más difícil la tarea de atraer agua hacia la planta, dado que la presión osmótica del suelo es cada vez más difícil de vencer.

Para caracterizar este fenómeno se utiliza el pH, la conductividad eléctrica y el PSI (porcentaje del sodio intercambiable). Este último se puede relacionar con la RAS (relación de adsorción de sodio) que compara la presencia de sodio, elemento que actúa como un separador y perjudica la permeabilidad del suelo, con el calcio y el magnesio, que aportan a la estructura del suelo y mejoran la permeabilidad. Para calcular estos parámetros se puede utilizar el método holandés o método del extracto de saturación.

A partir de estos valores es posible clasificar los suelos según lo indicado en la Tabla 18.

Tabla 18: clasificación de suelos según pH, CE y PSI. Fuente: Adaptado de Courel, F. (2019).

Clasificación	pH	CE [mS/cm]	PSI [%]*	RAS [%]**	Clasificación
Salinos	< 8.5	> 4	< 15	< 13	Salinización
Sódicos	> 8.5	< 4	> 15	> 13	Sodificación
Salinos - Sódicos	< 8.5	> 4	> 15	> 13	Salinización - Sodificación

$$*PSI = \frac{Na^+ \left(\frac{meq}{100\ gr}\right)}{CIC \left(\frac{meq}{100\ gr}\right)}; \text{ con CIC = Capacidad de intercambio catiónico. Depende del sustrato.}$$

$$**RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{+2}] + [Mg^{+2}]}/2}$$

Luego, se describen las propiedades, principales efectos y las posibles causas por las cuales estos suelos se comportan como salinos, sódicos o ambas.

Suelos Salinos

Los suelos salinos, según lo indicado en la Tabla 18, son los que poseen un pH menor a 8.5, una conductividad eléctrica mayor a 4 mS/cm y un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15% (equivalente a una RAS menor al 13%).

La salinidad se presenta en suelos con un régimen ascensional de humedad, donde la evapotranspiración es mayor que las precipitaciones, con flujos capilares ascendentes desde una napa freática salina, o debido a una dinámica de lixiviado restringido en épocas de lluvia. Generalmente en ambientes áridos o semiáridos. En este proceso se acumulan sales como cloruros, sulfatos de sodio, sulfatos de magnesio, entre otras, lo cual aporta a la estructura del suelo. En este proceso también se genera una interferencia en la absorción de potasio, calcio y NO_3^- , debido a la alta concentración de iones Na^+ y Cl^- , lo cual puede ser tóxico para las plantas. La acumulación de sales podría causar retardo o inhibición en la germinación, disminución en el tamaño de la planta, necrosis en las hojas, disminución en el rendimiento o muerte de la planta antes de completar su ciclo, todo lo anterior, debido a que la presencia de sales dificulta la absorción de agua mediante los procesos osmóticos o por la presencia de algún ion que genere toxicidad.

El diagnóstico para identificar un suelo salino en el campo, se puede realizar de manera directa debido a la presencia de vegetación halófila, la presencia de eflorescencias salinas de color blanco en la superficie del suelo, entre otros. Para el muestreo de un suelo salino, se sugiere realizar un análisis de hasta unos 90 a 100 centímetros de profundidad.

Finalmente, para un suelo salino se pueden tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Cambiar tipo de cultivo a uno más tolerante.
- Lavado de suelo:
 - Para áreas de secano es necesario asegurar el drenaje óptimo para el agua lluvia, y así, prevenir un aumento del nivel freático de napas salinas que podrían volver a incrementar la salinidad.
 - Para áreas bajo riego, se debe mejorar la calidad de agua de riego y aplicar un exceso de agua para lavar el suelo, asegurando un drenaje para que no se concentren sales en algún lugar.

Suelos sódicos

Los suelos sódicos, según lo indicado en la Tabla 18, son los que poseen un pH mayor a 8.5, una conductividad eléctrica menor que 4 mS/cm y un porcentaje de sodio intercambiable mayor a 15% (equivalente a una RAS mayor a 13%).

Este tipo de suelo se forma debido al aumento en la concentración de sodio en la solución del suelo, el cual genera que la doble capa eléctrica, que es la región que está entre dos fases, se encuentre expandida debido a los efectos de carga y el elevado radio hidratado del ion sodio. Esto genera un efecto de dispersión entre las partículas del suelo, y evita la formación de agregados, por lo que disminuye la estructura y con eso, la porosidad. En consecuencia, se ve afectada también la permeabilidad y la conductividad hidráulica del suelo (Courel, F., 2019)

Este deterioro produce que en la superficie se generen diferentes tipos de estructuras dependiendo de las texturas del suelo. Para el caso de las texturas finas o moderadamente finas, se generan arreglos del tipo laminar, con encostramiento, lo cual dificulta la emergencia del cultivo. Por otro lado, en suelos con acumulación de arcillas y de sodio intercambiable, es posible encontrar estructuras columnares conocidas como Solonetz. En general, los suelos sódicos generan “costras negras” que permiten identificarlos a simple vista.

Los suelos sódicos poseen una elevada concentración de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina del tipo carbonato o bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad. Esto puede aportar al incremento de pH, lo cual afecta drásticamente la disponibilidad de los nutrientes y la actividad biológica. Además, dado que la estructura del suelo podría estar dañada, se reduce la disponibilidad de oxígeno en el suelo y la oxigenación en la zona radicular, lo cual dificulta la germinación y el crecimiento de las raíces.

Finalmente, para un suelo sódico se pueden tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Cambiar tipo de cultivo a uno más tolerante según Tabla 19.
- Mejorar la estructura de los suelos:

- Sustituir el sodio intercambiable por iones de calcio. Aplicar yeso, azufre elemental o materia orgánica de naturaleza ácida. Esto disminuye el pH y el PSI, lo cual mejora la disponibilidad de los nutrientes y la estructura del suelo.

Suelo salino-sódico

Los suelos salinos-sódicos, según lo indicado en la Tabla 18, son los que poseen un pH menor a 8.5, una conductividad eléctrica mayor que 4 mS/cm y un porcentaje de sodio intercambiable mayor a 15% (equivalente a una RAS mayor a 13%).

Este tipo de suelo presenta una buena fertilidad física, pero posee todos los problemas de los suelos salinos y de los sódicos. Las recomendaciones para este tipo de suelos son las comentadas en las secciones anteriores.

Finalmente, es posible relacionar algunos cultivos que pueden crecer en diferentes tipos de suelo, dependiendo del porcentaje de sodio intercambiable. Estos se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Tolerancias de algunos cultivos según porcentaje de sodio intercambiable en el suelo. Fuente: García, A. (2012).

Sensibles PSI < 15 (suelos salinos)	Semitolerantes PSI 15 – 40 (suelos sódicos o salinos-sódicos)	Tolerantes PSI > 40 (suelos sódicos o salinos-sódicos)
Palta	Zanahoria	Alfalfa
Frutales de hoja caduca	Festuca alta (forrajera)	Algodón
Nueces	Lechuga	Cebada
Algodón en germinación	Caña de azúcar	Pasto Bermuda
Maíz	Avena	Pasto Pará
Arveja	Cebolla	Betarraga
Pomelo	Rábano	Remolacha azucarera
Poroto	Arroz	Maicillo
Lenteja	Mango	
Maní	Espinaca	
Caupí	Trigo	

4.2 Contaminantes críticos en el agua de riego

4.2.1 Salinidad

La salinidad del agua hace referencia a la concentración de SDT o su conductividad eléctrica (capacidad que tiene el agua para conducir la electricidad). Las principales sales disueltas presentes en el agua son los cationes de sodio, calcio y magnesio, y los aniones de cloruro, sulfato y bicarbonato.

La salinidad es muy importante debido a su relación con la capacidad de dilución de gases en el agua, donde a mayor salinidad, menor capacidad de dilución de gases se tiene en el fluido. Es importante para los ecosistemas, donde algunos seres vivos sobreviven a ambientes más bien salinos y otros a menos salinos. En particular, los cultivos necesitan ciertas concentraciones de SDT para permanecer saludables, pero a

concentraciones elevadas, estos podrían experimentar estrés salino, lo cual afecta su rendimiento y sus propiedades.

Las altas concentraciones de SDT en los suelos debido al aporte continuo por un riego con exceso de iones en solución, generan un efecto osmótico que reprime en cierta medida que las plantas logren absorber agua, lo que perjudica su crecimiento. En la ilustración 7 es posible observar en una planta de apio, el claro efecto del aumento de la conductividad eléctrica.



Ilustración 7: Efectos osmóticos en una planta de apio debido a un incremento en la conductividad eléctrica de 0 a 12 mS/cm. Fotografía: L. Francois. Fuente: Grattan, S. 2018.

La tolerancia a los SDT se caracteriza mediante dos parámetros, uno correspondiente al valor máximo de conductividad eléctrica que un cultivo puede tolerar antes que su rendimiento disminuya, y la recta que define la relación entre la conductividad eléctrica y el rendimiento del cultivo, ambos se representan en la Ilustración 8. Considerando ambos parámetros y la zonificación existente para la clasificación, es posible determinar si un cultivo es sensible, moderadamente sensible, moderadamente tolerante, tolerante o inadecuado. En general, la mayoría de los árboles se consideran sensibles o moderadamente sensibles, mientras que el pasto y forraje como moderadamente tolerantes a tolerantes. Es necesario indicar que se muestra la conductividad eléctrica del extracto de saturación (muestra de suelo saturada) y no de la CE del agua de riego. Generalmente esta relación se simplifica y se dice que la CE del extracto de saturación es 1,5 veces mayor a la CE del agua de riego.

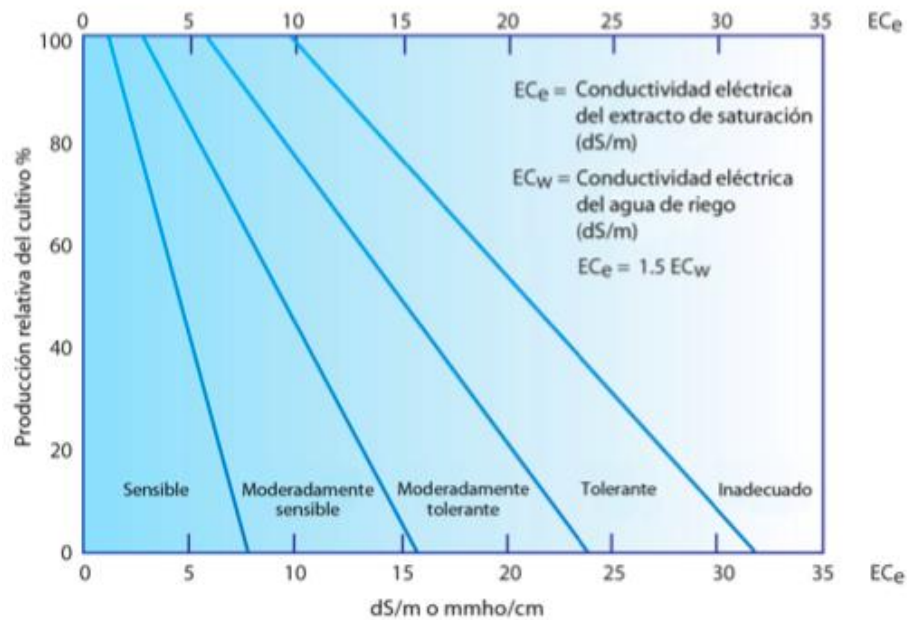


Ilustración 8: Producción relativa de un cultivo en función de la salinidad promedio en las raíces, el área bajo la curva define la tolerancia o sensibilidad a la salinidad. Fuente: Grattan, S. 2018.

Luego, algunos ejemplos de cultivos con sus respectivos rendimientos en función de la conductividad eléctrica y clasificados según los rangos establecidos por la ilustración anterior (sensible, moderadamente sensible, moderadamente tolerante, tolerante, y se incluye la clasificación “muy tolerante”), incluyendo tolerancias para el boro, se observan en la ilustración 9.

Nuevamente, es intuitivo cultivar especies que presenten algún grado de tolerancia para lograr un crecimiento óptimo y reduciendo el tratamiento necesario. Algunas de ellas son, la acelga, el algodón, la remolacha, cebada, espárragos, trigo, entre otros.

Cultivo	% de potencial productivo*				Nivel de tolerancia†	
	100	90	75	50	Salinidad	Boro
	EC del agua de riego (dS/m)					
acelga	4.7	5.8	7.6	10.5	T	—
ajo	2.6	3.1	3.8	4.9	MS	T
alcachofas	4.1	4.6	5.5	7.0	MT	MT
alfalfa	1.3	2.2	3.6	5.9	MS	T
algodón	5.1	6.4	8.4	12.0	T	VT
apio	1.2	2.3	3.9	6.6	MS	VT
arroz	1.9	2.6	3.4	4.8	S	—
berenjena	0.7	1.7	3.1	5.6	MS	—
betabel o remolacha	4.7	5.8	7.5	10.0	T	T
betabel rojo	2.7	3.4	4.5	6.4	MT	T
brócoli	1.9	2.6	3.7	5.5	MS	MS
calabaza (pumpkin)	—	—	—	—	MS	—
calabaza (scallop)	2.1	2.6	3.2	4.2	MS	T
calabaza (zucchini)	3.1	3.8	4.9	6.7	MT	MT
camote	1.0	1.6	2.5	4.0	MS	S
caupí	3.3	3.8	4.7	6.0	MT	MT
cebada	5.3	6.7	8.7	12.0	T	MT
cebolla (bulbo)	0.8	1.2	1.8	2.9	S	VT
cebolla (semilla)	0.7	1.5	2.8	4.8	MS	—
chícharo	2.3	2.9	3.8	5.4	MS	MS
chile	1.0	1.5	2.2	3.4	MS	MS
chirivía	—	—	—	—	S	—
col de Bruselas	—	—	—	—	MS	—
coliflor	1.9	2.6	3.7	5.5	MS	MT
col rizada	—	—	—	—	MS	—
espárragos	2.7	6.1	11.1	19.4	T	VT
espinacas	1.3	2.2	3.5	5.7	MS	—

Cultivo	% de potencial productivo*				Nivel de tolerancia†	
	100	90	75	50	Salinidad	Boro
	EC del agua de riego (dS/m)					
fresas	0.7	0.9	1.2	1.7	S	S
frijol alado	—	—	—	—	MT	—
frijol común	0.7	1.0	1.5	2.4	S	S
frijol mung	1.2	1.5	2.0	2.8	S	S
habas	—	—	—	—	MT	S
hinojo	0.9	1.4	2.0	3.0	S	—
lechuga	0.9	1.4	2.1	3.4	MS	MS
maíz dulce	1.1	1.7	2.5	3.9	MS	MT
mandioca	—	—	—	—	MS	—
melón de amistle	0.7	1.5	2.7	4.6	MS	MT
nabo	0.6	1.3	2.5	4.3	MS	MT
nabo (hojas)	2.2	3.8	6.1	8.0	MT	—
papa	1.1	1.7	2.5	3.9	MS	MS
pepino	1.7	2.2	2.9	4.2	MS	MS
pera pigeon	—	—	—	—	S	—
quimbombó	—	—	—	—	MS	—
rábano	0.8	1.3	2.1	3.4	MS	—
repollo	1.2	1.9	2.9	4.6	M	MT
sandía	—	—	—	—	MS	—
tomate	1.7	2.3	3.4	5.0	MS	T
tomate cherry	1.1	1.9	3.0	4.8	MS	—
trigo	4.0	4.9	6.3	8.7	T	S
zanahoria	0.7	1.1	1.9	3.0	S	MS

CLAVE: S = sensible; MS = moderadamente sensible; MT = moderadamente tolerante; T = tolerante; VT = muy tolerante. En referencia a las concentraciones de boro en el agua del suelo, S = 0.5–1.0 mg/L; MS = 1.0–2.0 mg/L; MT = 2.0–4.0 mg/L; T = 4.0–6.0 mg/L; y VT = > 6.0 mg/L.

Raya (—) = información no disponible.

Fuente: Maas and Grattan 1999; Grieve et al. 2012.

*Basado en información presentado en Grieve et al. 2012.

†Estos valores sirven solo como una guía sobre la tolerancia relativa entre los cultivos.

Las tolerancias absolutas varían, dependiendo del clima, condiciones del suelo y prácticas culturales.

Ilustración 9: Tolerancia de los cultivos a la salinidad, medida a partir de la conductividad eléctrica del agua de riego, según sus rendimientos. También se muestra la tolerancia para el boro. Fuente: Grattan, S. (2018).

4.2.2 Boro

El boro es un elemento químico natural que se encuentra generalmente como ácido bórico debido a su $pK_a = 9,24$. Sus beneficios para el ser humano y los animales se encuentran aún en debate, pero para los cultivos, a bajas concentraciones es considerado como micronutriente (Beltrano, J., Gimenez, D., 2015), pero a mayores, según tolerancias indicadas en la Tabla 20, como un elemento tóxico, restringiendo el crecimiento de los cultivos y generando condiciones contraproducentes para la agricultura.

Este elemento se transporta por el agua y las plantas mediante cuatro mecanismos diferentes:

- Captación pasiva: El ácido bórico se transporta por difusión por las capas lipídicas debido a gradientes de concentración. Es el principal mecanismo de transporte cuando existe una alta concentración de boro.
- Absorción facilitada: Algunas proteínas intrínsecas mayores actúan como canales para la captación de boro en forma de ácido bórico.
- Captación activa: Cuando existe una baja concentración de boro, actúan transportadores activos para su absorción.
- Flujo de salida activo: Mecanismo que exporta el boro de las células de las raíces hasta el apoplasto¹ de las células de las hojas. Ocurre para disminuir la concentración excesiva de boro de las células de la planta.

Por otro lado, la absorción de boro por parte de la planta es afectada por:

- pH del suelo: Si el valor es menor a 7, el elemento se encuentra como ácido bórico (disponible para las plantas). En caso de suelos alcalinos, es probable encontrar el boro como anión borato, el cual es absorbido por la materia orgánica, óxidos y las arcillas, por lo que no está fácilmente disponible para las plantas.
- Materia orgánica en el suelo: Afecta la absorción debido a que se puede unir al boro por intercambio de ligandos, o puede formar complejos B-diol con compuestos polihidroxilados.
- Textura del suelo: Es más probable encontrar altas concentraciones de boro en suelos finos que en gruesos. Las arcillas adsorben boro, mientras que en las arenas se favorece el proceso de lixiviación.
- Salinidad: La toxicidad del boro se presenta generalmente en suelos salinos, por lo que es posible que se relacione al riego con altas concentraciones de sales y boro, o que el suelo proviene de sedimentos marinos con altas concentraciones de estos minerales. La relación no está completamente clara, pero existe tendencia de que la captación pasiva de boro por parte de la planta disminuye por la presencia de altas concentraciones salinas.

¹ Espacio extracelular periférico a la membrana del plasma constituido por paredes celulares y los espacios entre células. Permite el paso de agua y solutos.

Las concentraciones elevadas y bajas de este elemento, con respecto a los requerimientos de la planta, generan una alteración importante en su desarrollo, afectando su anatomía, fisiología y sus procesos bioquímicos. Por otro lado, cada especie se relaciona de manera distinta con el boro, donde es posible encontrar plantas en que el boro es móvil (se mueve por el floema, por lo que cuando el boro llega a la hoja este es capaz de distribuirse por toda la planta), o inmóvil (no se mueve por el floema, por lo que se concentra en las hojas).

En general, los síntomas de toxicidad por boro se muestran primero en las hojas más antiguas, produciendo amarillamiento debido a la falta de clorofila (clorosis), puntos, o el secado de puntas y bordes de las hojas. El secado y clorosis progresan hacia el centro de las hojas a medida que el boro se acumula. En algunos cultivos arbóreos como el almendro, el síntoma es más bien un exudado generado en las ramas o el tronco. La clasificación de los cultivos según concentración de boro se muestra en la Tabla 20. Es intuitivo considerar las plantas más tolerantes en caso de tener agua con exceso de boro, algunas de ellas son la lechuga, espárrago, alfalfa, cebolla, entre otras.

Tabla 20: Clasificación de los cultivos según el contenido de boro. Fuente: Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies, 1996.

Tolerancia del cultivo según la concentración límite de toxicidad en mg/l. del agua de riego		
Sensibles (0.3 – 1.0 mg/l de B)	Semitolerantes (1.0 – 2.0 mg/l de B)	Tolerantes (2.0 – 4.0 mg/l de B)
Pera Manzana Vid Cereza Melocotón Haba Nueces Ciruelo Albaricoque Naranja Pomelo Limón	Girasol Papa Algodón Rábano Olivo Cebada Trigo Maíz Avena Batata Lima Calabaza	Espárrago Palmera Canaria Palmera Dactilífera Remolacha de jardín Remolacha azucarera Alfalfa Gladiolo Cebolla Nabo Col Lechuga Zanahoria

4.2.3 Azufre

El azufre es un elemento químico de la tabla periódica que pertenece al grupo de los macronutrientes esenciales de las plantas. Es posible encontrarlo en los ecosistemas debido a su presencia en las rocas, en los suelos debido al contacto con lluvia ácida, la disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos. Por otro lado, tiene un origen antrópico, donde se encuentra como consecuencia de actividades urbanas, industriales y agrícolas.

Las plantas absorben azufre desde la solución del suelo por sus raíces únicamente en forma de sulfato mediante diferentes transportadores, los cuales actúan en contra de gradiente a través de las membranas lipídicas (proceso que requiere energía). El sulfato captado por las raíces es en parte almacenado por estas mismas, y luego, transportado hacia las hojas donde es reducido por los cloroplastos. Al instante, parte del exceso de este nutriente puede ser almacenado en vacuolas.

Bajo concentraciones suficientes de sulfato, un 50% del azufre sería almacenado en las hojas en forma insoluble (como proteínas), un 42% en forma de sulfato y el resto como glutatión o glucosinolatos (Blake-Kalff et al., 1998) los cuales permiten combatir insectos, hongos y microorganismos.

La reducción del sulfato dentro de la planta ocurre de manera que este es transformado primero en sulfito y luego en sulfuro, el cual finalmente se utiliza para formar cisteína, un aminoácido no esencial que es utilizado nuevamente para formar metionina mediante una serie de reacciones. Debido a que el azufre participa en la formación de estos aminoácidos, es posible indicar que está presente en casi todas las proteínas de la planta.

Respuesta frente a la deficiencia y al exceso de azufre

El consumo de sulfato se controla mediante los requerimientos propios de la planta. Donde para un alto suministro de sulfato en la solución del suelo, se reduce el consumo, y cuando los niveles son bajos en la planta, se aumenta. Cuando los niveles de sulfato son adecuados, los excesos son almacenados en las vacuolas. Es necesario destacar que el sulfato en solución es móvil dentro de los suelos, por lo que el déficit se puede generar en suelos con buen drenaje que presentan lixiviación, y en suelos pobres en materia orgánica, los cuales permiten la mineralización del macronutriente.

Para controlar los niveles de azufre dentro de la planta, estas utilizan un sistema de removilización donde un porcentaje elevado de proteínas, entre ellas la rubisco, son transportadas desde las hojas más antiguas hacia las más jóvenes. Debido a que esta proteína contiene cisteína y metionina, fuentes importantes de azufre, la planta es capaz de controlar de manera sostenible sus reservas. En otras palabras, esto permite que, dada una concentración inicial adecuada de azufre en la planta, esta logra permanecer en una buena condición bajo escenarios de déficit de este macronutriente por un tiempo limitado (Abdallah et al., 2010). Luego, para bajas concentraciones de azufre, este es almacenado principalmente en las raíces en vez de las hojas. La pequeña parte que es transportada a las hojas, se dirige principalmente a las más jóvenes y estas transforman el sulfato, el glutatión y los glucosinolatos, en proteínas insolubles. Esto ocurre siempre y cuando exista la presencia de nitrógeno suficiente para lograr sintetizar proteínas.

La deficiencia de sulfato en la solución del suelo implica una disminución de la actividad de la enzima Rubisco, lo cual a la vez reduce el contenido de clorofila, por lo que las hojas se tornan amarillentas y disminuye la capacidad fotosintética de la planta. Por otro lado, eventualmente cesa la generación de proteínas, ocurre un desbalance entre la cantidad de nitrógeno y azufre, lo que reduce la asimilación del primero generando una restricción en la productividad de la planta. Debido a que el azufre es relativamente inmóvil dentro de la planta, los síntomas ocurren en las hojas nuevas antes que en las viejas, esto puede ayudar a diferenciar déficit entre azufre o nitrógeno.

Para el caso de un exceso de azufre, la planta presenta síntomas de fitotoxicidad en las hojas, presenciando manchas amarillas que finalmente pueden provocar necrosis. Por otro lado, la planta enfrenta una falta de crecimiento uniforme, generando una planta más pequeña y en ocasiones con un color verde oscuro. En casos graves, las puntas y bordes de las hojas se decoloran y queman.

Concentraciones admisibles

La concentración máxima de sulfato según la NCh 1.333 es de 250 mg/l. Luego, debido a que no se registran rangos de concentraciones en el agua para los cuales los cultivos son tolerantes o sensibles, se presentan en la Tabla 21 las concentraciones críticas de sulfato en los tejidos de las plantas, donde para una mayor concentración, se presentan síntomas de toxicidad por exceso, y para concentraciones menores, síntomas por deficiencia. Las concentraciones admisibles más altas se presentan en la alfalfa, canola, maíz, cebolla y en el girasol.

Tabla 21: Concentraciones de sulfato críticas para tejidos de diferentes cultivos. Fuente: Grant, C., Hawkesford, M. (2015).

Cultivo	Concentración peso seco suficiente [% peso seco]	Cultivo	Concentración peso seco suficiente [% peso seco]
Alfalfa	0,26 – 0,50	Papa	0,19 – 0,36
Cebada	0,15 – 0,40	Arroz	0,20 – 0,30
Canola	0,35 – 0,47	Ryegrass	0,10 – 0,25
Yuca	0,30 – 0,40	Soja	0,21 – 0,40
Algodón	0,20 – 0,25	Caña de azúcar	0,21 – 0,40
Caupí	0,17 – 0,22	Girasol	0,30 – 0,55
Maíz	0,21 – 0,50	Te	0,10 – 0,30
Avena	0,21 – 0,40	Trébol blanco	0,18 – 0,30
Cebolla	0,50 – 1,00	Trigo	0,15 – 0,40
Maní	0,20 – 0,35		

4.2.4 Cloruro

El cloro se puede encontrar en la naturaleza como cloro molecular, o en forma de ion cloruro, el cual se combina con otros cationes generando moléculas como cloruro de sodio, potasio, calcio y magnesio, los cuales son altamente solubles en el agua. Es posible encontrarlo en plantas, suelos, rocas, agua, aire, combinado con metales, no metales y materia orgánica. El cloruro difícilmente forma complejos, y a pH superiores a 7.0 no se absorbe por minerales, y solo se absorbe débilmente por suelos caoliníticos y oxídicos que tienen cargas positivas bajo condiciones ácidas. Es uno de los iones con mayor movilidad y fácilmente removido por procesos de lixiviación (Department of Water Affairs and Forestry, 1996).

A pesar de que este elemento es considerado un micronutriente, debido a que es generalmente abundante en la solución del suelo, el cloruro se estudia con un enfoque relacionado con su excesiva presencia (Xu et al., 2000).

Los cultivos absorben cloruro rápidamente dependiendo de la concentración existente en el suelo, y son controlados por su actividad metabólica, por lo que algunos cultivos, como la cebolla, requieren mayores concentraciones que otros. El ion cloruro entra por la raíz y se transporta por vías simplásticas y apoplásticas, donde para la primera, el agua y la mayor parte del cloruro se movilizan por vías intracelulares mediante mecanismos de osmosis y transporte activo, mientras que para el transporte apoplástico,

la mayor parte del agua y una parte del cloruro se moviliza por los espacios intercelulares hasta llegar a la banda de caspary (Kopsell, D.E., Kopsell, D.A., 2016).

De manera general, el ion cloruro participa de la fotosíntesis, donde un déficit en este puede reducir el área foliar generando una disminución en la capacidad fotosintética, aporta a la actividad enzimática, dado que muchas de estas requieren cloruro para su funcionamiento, entre ellas la asparagina sintetasa y ATPasa, aporta también a la compensación de cargas tanto para la regulación de la apertura y el cierre de estomas, como también de la osmorregulación (ajustes osmóticos) de toda la planta, los cuales ocurren generalmente en halófitas (Kopsell, D.E., Kopsell, D.A., 2016). En particular, para halófitas “excluseras”, los cultivos controlan el exceso de concentración de iones sodio y cloruro mediante una restricción en el transporte de estos y su extrusión desde las raíces. Captan agua gracias a la disminución del potencial hídrico en las células generado por la acumulación de malato y otros aniones orgánicos solubles en sus vacuolas. Para el caso de las incluseras, la ATPasa del tonoplasto acumula el cloruro en las vacuolas, donde no interfieren con el metabolismo. Esta acumulación disminuye el potencial hídrico de las células por debajo del potencial del suelo, lo que permite la entrada del agua a la planta (Greenway, H., Munns, R., 1980).

Condiciones excesivas

Determinar la toxicidad del cloruro es difícil debido a lo complicado que es diferenciar entre el efecto del cloruro como acompañante de un catión, y los efectos que generan las altas concentraciones de sales dentro de los tejidos, sumado a la deshidratación celular que se produce por una fuente externa de sales (Xu et al., 2000). Para identificar ciertamente la presencia de cloruro, se realizan análisis de los tejidos vegetales, donde la toxicidad para cultivos sensibles se da para concentraciones en las hojas entre 4 – 7 mg/g del peso seco, para halófitas, se presenta para concentraciones entre 15 – 50 mg/g de peso seco (Xu et al., 2000).

Los principales síntomas de toxicidad son la quemadura parcial de la hoja partiendo desde la punta y los bordes de esta. Para casos extremos, el exceso de cloruro genera la caída temprana de las hojas (Departament of Water Affairs and Forestry, 1996). Los síntomas se presentan primeramente en hojas más viejas y en una etapa terminal pueden generar la pérdida del cultivo.

La tolerancia de las plantas se divide según las siguientes categorías (Greenway, H., Munns, R., 1980).

- Halófitas que crecen rápidamente en ambientes con contenidos de sales del orden de los 200 a 500 mM de NaCl y lentamente por debajo de los 200 mM de NaCl.
- Halófitas y no-Halófitas cuyos crecimientos se reducen sustancialmente al permanecer en un ambiente con más de 100 mM NaCl. Se dividen en tolerantes (Festuca rubra, algodón y la cebada), intermedias (tomates) y sensibles (frijoles y la soja).
- No-halófitas muy sensibles a las sales, como los cítricos.

Algunos cultivos que presentan tolerancia son la remolacha azucarera, la cebada, maíz, espinacas y el tomate, mientras que el tabaco, frijoles, cítricos, papas, lechuga y

algunas legumbres son bastante propensas a sufrir los efectos del exceso de cloruro. Estos últimos se denominan cultivos clorofóbicos.

Finalmente, es posible mencionar que algunas plantas se comportan de manera más o menos sensibles con respecto a la concentración de sodio o cloruros en las aguas de riego. La relación entre esas concentraciones y los cultivos se muestran a continuación. Es necesario destacar que para la Tabla 22 se informan concentraciones en el agua de riego, mientras que para la Tabla 23 en la solución del suelo.

Tabla 22: Concentraciones críticas de aguas de riego por aspersión cloruradas sódicas para las cuales los cultivos presentan riesgo de daños foliares. Fuente: Adaptado de Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996).

Concentración de cloruros en las aguas de riego por aspersión causante de daños foliares (mg/l)			
< 180	180 – 360	360 – 710	> 710
Almendro	Vid	Alfalfa	Algodón
Ciruelas	Tomates	Maíz	Remolacha azucarera
Cítricos	Papas	Cebada	Girasol
Albaricoco		Pepinos	
		Sorgo	

Tabla 23: Concentraciones máximas en la solución del suelo, a partir de las cuales aparecen síntomas de toxicidad por cloruro. Fuente: Irrigation water quality standards and salinity management strategies (1996)

Cultivo	Tolerancia de Cl- en solución del suelo [mg/l]	Cultivo	Tolerancia de Cl- en solución del suelo [mg/l]
Fresa	350	Col	525
Haba	350	Apio	525
Cebolla	350	Espinaca	700
Zanahoria	350	Alfalfa	700
Rábano	350	Pepino	875
Lechuga	350	Tomate	875
Nabo	350	Brócoli	875
Pimienta	525	Arroz	1.050
Maíz	525	Césped	1.575
Lino	525	Algodón	1.625
Papa	525	Poroto	1.750
Batata	525	Cebada	2.100

4.2.5 Arsénico

El arsénico se considera como uno de los metaloides más tóxicos presentes en el medio ambiente, pero también, como una toxina esencial (Uthus, E.O., 1992) debido a que algunos organismos requieren pequeñas concentraciones para su crecimiento y metabolismo (Krumova et al., 2008). Se encuentra en el suelo, aire, agua (Tsai et al., 2009), y en organismos, por ejemplo, pescados y moluscos (Stolz, J.F., Basu, P., Oremland R.S., 2002) en forma de arsenobetaina o arsenocolina. Es utilizado como preservante de madera, pesticidas, construcción de semiconductores, y es posible encontrarlo como subproducto de algunos procesos relacionados con la minería, la quema de carbón, entre otros. Es un elemento químico que preocupa a la Organización Mundial de la Salud (OMS) ya que su presencia en el agua y en alimentos ha provocado

tanto intoxicaciones como problemas ambientales, por lo que existe un gran interés en lo que respecta a su detección, remoción y/o contención. La OMS considera perjudicial consumir agua con concentraciones mayores a 10 µg/lit.

La especiación de este elemento depende de factores químicos, físicos y biológicos, como también de procesos naturales y antropogénicos. Con esto en consideración, es posible encontrar arsénico en forma de arsina (H_3As), arsenito As (III), arseniato As (V), arsénico elemental As (0), donde el primero es el más tóxico y el último el menos tóxico (Tsai et al., 2009). Dado que en la solución del suelo generalmente se encuentra el arsénico en forma de arsenito y arseniato, se presentan sus principales características:

- El As (III) entra en las células a un pH neutro mediante proteínas de transporte de glicerol en bacterias, levaduras y mamíferos. Esta se une a los grupos sulfhidrilo de los residuos de cisteína en las proteínas y las inactiva. Además, actúa como disruptor endócrino (Tsai et al., 2009).
- El As (V) actúa como sustituto del fosfato, por lo que es capaz de inhibir la fosforilación oxidativa y entrar en las células a través del sistema de transporte del fosfato (Tsai et al., 2009).

Dado que el As (V) es más fácil de remover que el As (III) debido a mayor carga negativa, se busca generar un mecanismo de oxidación que permita transformar As (III) en As (V). La especiación del arsénico según pH y potencial redox se muestra en la Ilustración 10.

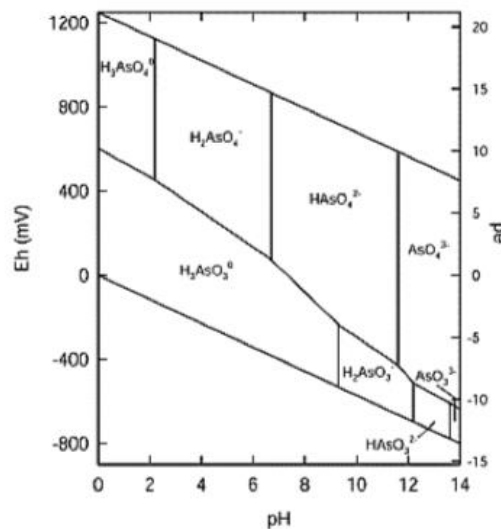


Ilustración 10: Especiaciones del arsénico según potencial redox y pH, a 25°C y 1 bar de presión. Fuente: Rangel et al. (2015)

Efecto del arsénico en las plantas para diferentes concentraciones

Como se comentó anteriormente, para concentraciones muy bajas el arsénico se comporta como toxina esencial, pero a medida que la concentración aumenta, en particular en cultivos, el rendimiento disminuye ya que el arsénico comienza a inhibir la producción de enzimas, destruyendo la clorofila en el follaje. En general, a

concentraciones entre 0,5 – 10 mg/L, el arsénico es tóxico para una gran cantidad de especies de plantas. En otras, como la remolacha, este tiende a acumularse en las raíces.

Finalmente, se recomienda para periodos largos de riego, una concentración máxima de 0.1 mg/l de arsénico, y para periodos cortos, una máxima de 2 mg/l (Irrigation water quality standards and salinity management strategies, 1996).

Los efectos de otros metales pesados se presentan en el Anexo 1.

4.3 Procesos de tratamiento para remover los contaminantes críticos identificados.

Para lograr los estándares de calidad de agua para los cultivos, es necesario utilizar procesos de tratamiento que permiten reducir la concentración de algunos elementos o contaminantes de manera específica. Algunas tecnologías utilizadas para esto, se enumeran a continuación:

1. Procesos de membrana tales como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis.
2. Intercambio iónico.
3. Adsorción.
4. Procesos redox.
5. Precipitación.

Cada elemento o compuesto se comporta de manera distinta en el agua, por lo que los procesos que participan en su remoción, son también diferentes.

4.3.1 Procesos específicos

4.3.1.1 *Procesos de tratamiento para remover el boro del agua*

Los principales mecanismos que permiten reducir los niveles de boro en el agua son la osmosis inversa y el intercambio iónico, luego, dependiendo de la concentración, y en algunos casos la temperatura, se recomiendan combinaciones de estos procesos para obtener los resultados esperados. En particular, se tienen las siguientes referencias con respecto a la remoción.

- Para aguas salobres a 25 °C con concentraciones menores a 4,4 mg/lit, se recomienda un proceso de osmosis inversa con membranas de alto rechazo para agua salobre (Lenntech, 1998-2020). Para temperaturas mayores a 25°C en el agua, este límite se puede reducir hasta los 2,8 mg/lit, por lo que se debe complementar el tratamiento.
- Para aguas salobres con cantidades mayores de boro (4 – 5,5 mg/L) es posible utilizar un tratamiento con osmosis inversa con membranas de alto rechazo para agua salobre, y solo si es necesario, es posible aumentar el tratamiento con filtros de resina

selectiva para permitir el intercambio iónico (Pure Aqua, 2000-2020), otra opción, es aplicar un tratamiento en serie con un filtro de osmosis inversa con membrana de alto rechazo para agua de mar, seguido de un proceso de OI con membrana de alto rechazo para agua salobre (Lenntech, 1998-2020).

- Para agua de mar con boro (4 – 5,5 mg/l), se recomienda también un filtro de OI con membrana de alto rechazo para agua de mar, y solo si es necesario, en serie con 2 filtros de resina, estos últimos van en paralelo (Lenntech, 1998-2020). También un tratamiento en serie de dos filtros de OI, el primero con membrana de alto rechazo para agua de mar y el segundo con membrana para agua de mar de baja energía (Pure Aqua, 2000-2020).

Si bien se indica que es necesario aplicar combinaciones de tratamientos cuando se tiene agua de mar y concentración de boro del orden de los 4 mg/l, en la práctica, esta concentración se logra remover con solo un proceso de OI con membrana de alto rechazo, siempre y cuando el pH sea elevado.

Finalmente, si bien la NCh 1.333 indica una concentración máxima de 0,75 mg/l de boro, de manera razonable es posible cultivar especies tolerantes como esparrago, lechuga, zanahoria, entre otros, que crecen aun cuando el agua tenga concentraciones entre 2 – 4 mg/l de boro.

4.3.1.2 Procesos de tratamiento para remover sulfato del agua

Los principales tratamientos para este elemento se relacionan a los procesos de osmosis inversa (algunas membranas logran hasta un 99% de remoción), nanofiltración, intercambio iónico, destilación, precipitación química y tratamiento biológico (el sulfato se reduce a sulfuro de hidrógeno y luego a azufre elemental). Por otro lado, otros procesos que combinan la nanofiltración y el uso de cal (para fomentar la precipitación de cristales de sulfato de calcio y otras sales de calcio y aluminio), fomentan la precipitación de sulfoaluminato de calcio, y permiten obtener niveles por debajo de los 50 mg/l de sulfato, desde efluentes mineros con alto contenido del mismo (Sanz, J., 2015).

4.3.1.3 Procesos de tratamiento para remover cloruro del agua

Los procesos de tratamiento para el cloruro son los nombrados en la sección 4.3.2, pero principalmente, dado que este elemento aporta a la salinidad en forma de ion, se recomiendan los procesos de osmosis inversa, electrodiálisis e intercambio iónico. La elección del sistema depende de la concentración de solidos disueltos totales (SDT). Como se comentó anteriormente, para evitar o reducir el tratamiento, es posible utilizar cultivos tolerantes. Si bien la NCh 1.333 determina 200 mg/l de cloruro, existen cultivos como la espinaca, que tolera 700 mg/l, o la cebada, que tolera 2.100 mg/l.

4.3.1.4 Procesos de tratamiento para remover arsénico del agua

Debido a que el arsénico es un elemento de interés mundial, se han encontrado variadas maneras de removerlo de las aguas, las cuales se pueden relacionar a los siguientes procesos:

- Osmosis inversa.
- Coagulación/adsorción mediante FeCl_3 y filtración.
- Adsorción (se puede utilizar óxido férrico adsorbente)
- Intercambio iónico.

Además, existen algunos procesos que facilitan la remoción:

- Proceso de óxido-reducción por microorganismos: Algunas bacterias son capaces de transformar As (III) a As (V) y viceversa como mecanismo de defensa.
- Oxidación con oxígeno, ozono, hipoclorito, cloro, permanganato, peróxido de hidrógeno y radiación UV.
- Precipitación-coprecipitación. Permite obtener arsénico en estado sólido.

Como algunos de ellos logra remover el arsénico de manera parcial o solo facilitar el proceso, estos deben ser aplicados en serie.

4.3.2 Desalinización

La desalinización es el proceso de eliminación de sales disueltas del agua, produciendo de este modo el agua dulce a partir del agua de mar o agua salobre. Durante los últimos años, las tecnologías relacionadas con los procesos de desalación han avanzado rápidamente, dado que la necesidad por encontrar nuevas fuentes de agua se transformó en algunos lugares del mundo en una prioridad, y países como Israel son los que hoy en día lideran estos procesos.

En particular, Chile posee uno de los mayores potenciales y capacidades para el desarrollo de la desalinización debido a la gran demanda de agua que requiere la minería, en particular, en zonas con escasez hídrica (Comisión de Minería y Energía de la Cámara de diputados, 2017). Además, su extenso contacto con el mar permite que esta tecnología sea viable para prácticamente cualquier sector costero del país.

Para comprender la diferencia entre el agua salobre y el agua de mar, en la Tabla 24 se muestran los rangos típicos de salinidad, medida en sólidos disueltos totales (SDT), para cada categoría.

Tabla 24: Caracterización del tipo de agua según el contenido de sal. Fuente: Fritzmann, C., Löwenberg, Wintgens, T., Melin, T., 2007.

Categoría/Fuente	SDT mínimo [mg/lt]	SDT máximo [mg/lt]
Agua de mar	15.000	50.000
Agua salobre	1.500	15.000
Agua de río	500	1.500
Agua Pura	0	500

La desalinización se lleva a cabo mediante diferentes tecnologías. Principalmente, se dividen en tecnologías de membrana y tecnologías térmicas.

4.3.2.1 Tecnologías de membrana

Las tecnologías de membrana consisten en la aplicación de películas semipermeables para impedir el paso de algunos componentes del agua, por ejemplo, pesticidas, virus, casi la totalidad de los iones, entre otros. Principalmente existen dos tipos de tecnología que funcionan bajo este principio, el mecanismo de osmosis inversa, y la electrodiálisis. Ambos procesos pueden ser utilizados en sentido contrario, de forma que existe también la osmosis directa y el proceso de electrodiálisis inversa.

- **Osmosis inversa (OI):** Consiste en la difusión de agua a través de una membrana semipermeable desde una solución con alta concentración de sólidos disueltos totales (SDT) a una con baja concentración mediante el aumento de presión aplicada por una bomba. Se utiliza para agua de mar y agua salobre, consumiendo en promedio sobre 3 kWh/m³ de energía para agua de mar (Fraunhofer Chile, 2017). Es necesario considerar que el consumo energético varía según la calidad del agua a tratar, a mayor concentración inicial de SDT, mayor consumo energético.
- **Electrodiálisis (ED):** Filtración mediante procesos eléctricos utilizando membranas de transferencia catiónica y aniónica. Este proceso utiliza una fuerza eléctrica perpendicular al flujo, que genera la separación de aniones debido a la presencia de estas membranas. Su aplicación es solo para soluciones salobres o reutilización de aguas residuales, dado que salinidad admisible es de hasta 3.000 mg/L (Fraunhofer Chile, 2017).

4.3.2.2 Tecnologías térmicas

Las tecnologías térmicas destilan el agua salada mediante la aplicación de calor, la disminución de la presión, o una combinación de lo anterior. Estos métodos generan salmueras temperadas, lo cual genera una disminución en la viscosidad y facilita su manipulación.

- **Destilación solar:** Proceso de evaporación del agua mediante la radiación solar, para luego obtener agua de mejor calidad al momento de condensarla. Requiere grandes superficies y un bajo (nulo) coste energético. Se puede utilizar para casi cualquier concentración inicial de sales.
- **Flash multietapa (MSF):** Proceso que evapora el agua mediante el aumento de la temperatura y la disminución de presión, para luego condensarla. Este proceso tiene varias etapas y utiliza el vapor producido para aumentar la temperatura del agua de alimentación, para reducir la cantidad necesaria de calor en la primera etapa. Este proceso es el más utilizado a lo largo del mundo (sobre todo en el medio oriente), pero también es uno de los que utiliza más energía, por lo que es solo factible para países con bajos costos en energía.

- **Destilación multiefecto (MED):** Proceso similar al MSF, pero con evaporación natural en una cara de un tubo de un intercambiador, mediante el aprovechamiento del calor latente desprendido por la condensación en la otra cara del intercambiador. Es un proceso en cascada.
- **Compresión térmica de vapor (MED-TVC):** Consiste en un proceso similar a una destilación multiefecto, pero la fuente de energía es un termocompresor. Se obtiene una presión de vapor media desde una planta de generación eléctrica, y se succiona parte del vapor de baja presión obtenida de la última etapa del ciclo. La combinación genera un vapor de presión intermedia que permite reiniciar el ciclo mediante la condensación del mismo, y su generación de energía por el calor latente desprendido.
- **Compresión mecánica de vapor (MVC):** Similar a un TVC, pero usa compresiones mecánicas en vez de un termocompresor para condensar el agua evaporada.
- **Absorción por compresión de vapor:** Se genera una diferencia de presión entre dos acumulaciones de agua. Debido a lo anterior, se produce la evaporación y condensación.

4.3.2.3 *La desalinización como una alternativa. Características y consideraciones de los procesos.*

El principal método para lograr la desalación del agua es el de osmosis inversa, el cual utiliza 3.0 entre 4.0 kWh/m³, dependiendo factores como la calidad del agua a tratar, la membrana utilizada, entre otros (Fundación EOI, 2014; Comisión de Minería y Energía de la Cámara de Diputados, 2017).

En el Gráfico 1 se muestra el detalle de la distribución de los costos para el proceso de OI para agua de mar.

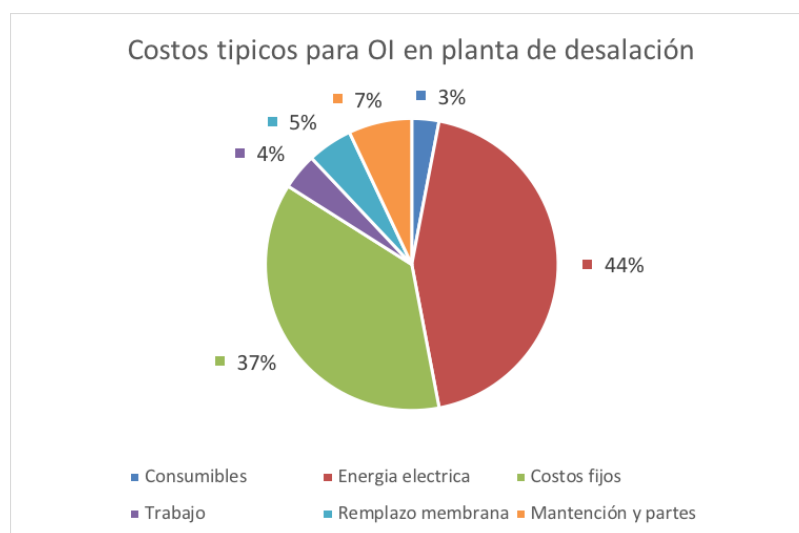


Gráfico 1: Distribución de costos para la operación de una planta de OI. Fuente: Adaptado de UNAP (2017).

Respecto a las tecnologías térmicas, la MED se comporta de manera más eficiente que las plantas MSF con respecto al uso de energía eléctrica, debido a que aprovecha el

calor latente generado en sus procesos (Brakemeier, D., 2015), es por esto que las hacen ideales para acoplarlas a sistemas de energías renovables como una planta solar térmica. Luego, si estas plantas MED son implementadas sin compresión térmica de vapor (TVC), estas serían menos sensibles a parámetros de vapor variables, o a partidas y detenciones.

Incluyendo a los procesos de membrana (OI y ED), se muestra en la Tabla 25, los valores aproximados de consumo de energía, costos de producción (OPEX) e inversión (CAPEX). Los menores costos de producción e inversión son para la OI.

Tabla 25: Consumo de energía, costos de producción e inversión para los procesos de Osmosis Inversa (OI), Destilación Multi efecto (MED), Flash multietapa (MSF) y electrodiálisis (ED). Fuente: Fraunhofer (2017); Brakemeier, D. (2015).

Proceso	Consumo de energía total [kWh/m ³]	Costo de producción [US\$/m ³]	Costo de inversión [US\$/m ³]	Referencia
OI (agua salobre)	0,3 – 2,8	0,2 – 1,8		Fraunhofer (2017)
OI (agua de mar)	≈ 3	0,5 – 3		Fraunhofer (2017)
OI (agua de mar)		0,47	1.300 – 2.500	Brakemeier, D. (2015)
MED	5,7 – 7,8	0,7 – 3,5		Fraunhofer (2017)
MED		0,54	1.700 – 2.700	Brakemeier, D. (2015)
MSF	12,7 – 15	0,9 – 4		Fraunhofer (2017)
MSF		0,64	1.700 – 2.900	Brakemeier, D. (2015)
ED	≥ 0.6	1,2		Fraunhofer (2017)

El detalle del OPEX se muestra en el Gráfico 2. Esta comparación se realiza a partir de datos de GWI del año 2010.

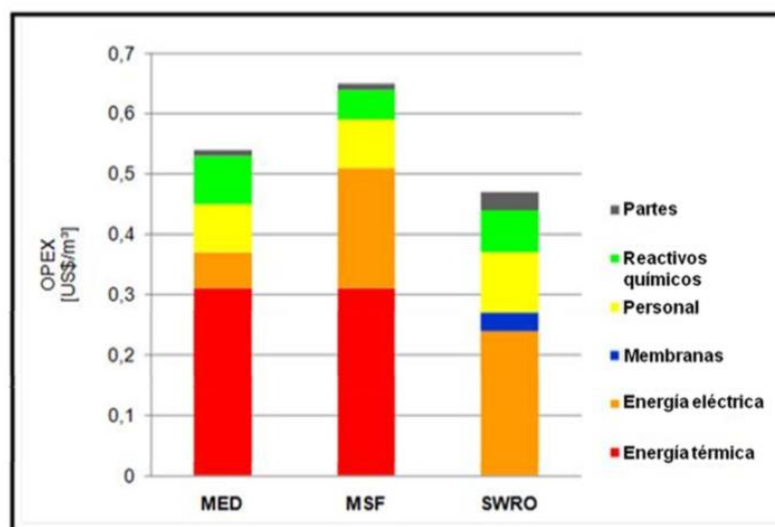


Gráfico 2: OPEX para tecnologías convencionales de desalinización. Fuente: Brakemeier, D., 2015, en Evaluación económica entre osmosis inversa y desalinización solar térmica, a partir de datos de GWI 2010.

Luego, las eficiencias de las tecnologías de membranas (OI, ED), en comparación a las tecnologías térmicas más comunes (MSF, MED, TVC) se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Porcentaje de remoción de contaminantes para tecnologías de destilación en comparación con tecnologías de membrana. Fuente: Fraunhofer Chile, 2017

Contaminante	Destilación [%]	ED/EDR [%]	OI [%]
SDT	> 99,9	50 – 90	90 – 99,5
Pesticidas orgánicos	50 – 90	< 5	5 -50
Patógenos	> 99	< 5	>99,99
Carbono orgánico total	> 95	< 20	95 – 98
Radiológico	> 99	50 – 90	90 – 99
Nitrato	> 99	60 – 69	90 – 94
Calcio	> 99	45 – 50	95 – 97
Magnesio	> 99	55 – 62	95 – 97
Bicarbonato	> 99	45 – 47	95 – 97
Potasio	> 99	55 – 58	90 – 92

Por otro lado, si bien la tecnología para desalar es cada vez menos costosa, es importante realizar un pre-tratamiento y un post-tratamiento, ya que el consumo energético del proceso equivale a generar entre 1.4 y 1.8 kilogramos de CO₂/m³, gas de efecto invernadero que hoy en día es imperante evitar, y como resultado se obtienen salmueras que, en caso de ser derramadas sin contención, generan un impacto ambiental importante. Además, el proceso de succión de agua de mar deteriora el ecosistema que rodea la captación (Elimelech, M., Phillip, W., 2019).

Finalmente, dado que el costo operacional de la planta está fuertemente vinculado con la distancia a la que se requiere el recurso de agua tratada y el costo de la energía disponible, el elaborar un plan colaborativo entre sectores económicos, y centralizar el tratamiento en zonas estratégicas, podría permitir prorratar los costos de conducción entre el mar, la planta de tratamiento y el lugar en el cual se requiere el recurso. Además, como este tipo de proyectos es afectado por la economía de escala, es conveniente concentrar los esfuerzos en una gran planta de tratamiento, en vez de construir varias más pequeñas.

Luego, si bien existen estas tecnologías, generalmente los costos no permiten su aplicación masiva. Por lo mismo, la escasez hídrica sigue siendo un problema, y permanece la necesidad por aumentar la disponibilidad de agua. Debido a esto, surge el interés por utilizar otra fuente a partir del reúso de aguas residuales tratadas; proceso que encuentra un espacio en la economía circular y podría aportar en cierta medida al problema del agua en la zona norte.

5 Reúso de aguas residuales como nueva fuente

5.1 Contexto y consideraciones para el reúso en Chile

Las aguas residuales se clasifican de la siguiente manera:

- **Agua residual doméstica:** Es aquella que se origina en la vivienda y se relaciona con todas las actividades realizadas dentro de ella. También se consideran zonas residenciales, centros comerciales o instituciones. A su vez, se puede subclasificar en:
 - **Aguas negras:** provienen del uso del inodoro, por lo que en su mayoría están contaminadas con materia fecal.
 - **Aguas grises:** provienen del uso de la ducha, lavadero, lavatorio, entre otros. Posee grasas, materia orgánica y otros elementos. No posee bacterias fecales, ya que excluye a las aguas negras.
- **Agua residual municipal o urbana:** Es aquella que se origina a partir de los residuos del conjunto urbano, por lo que puede ser debido a actividades residenciales, industriales, recreativas, y en general, toda el agua transportada por la red de alcantarillado, incluyendo el agua lluvia.
- **Agua residual industrial:** Se origina por la actividad industrial o comercial debido a la producción, lavado, refrigeración, entre otros. Se excluyen las aguas domésticas y las aguas de origen pluvial.
- **Aguas lluvias:** Originada el escurrimiento generado por las precipitaciones.

Existen distintas formas de reutilizar las aguas residuales, en esta ocasión se enfatiza en los procesos relacionados con el riego utilizando fuentes superficiales mezcladas por efluentes tratados, o en el riego con aguas residuales tratadas.

Hoy en día, el reúso de aguas residuales, y en particular el uso para la agricultura, es un tema que ha sido abordado por muchos otros países como EEUU, Australia, Arabia Saudita, Israel, Chipre, Perú, Jordania, entre otros (FCH, 2018), los cuales avanzan en políticas públicas que impulsan este método para lograr contrarrestar los efectos negativos relacionados a la extracción permanente de recursos superficiales o subterráneos con fines consuntivos, y combatir el hecho de que a nivel mundial se generen aproximadamente 608 millones de metros cúbicos al día de agua residuales domésticas, y que solo un 4% es tratado (GWI, 2010). En Chile, el reúso de aguas servidas tratadas es potencialmente atractivo, considerando que posee una gran cobertura de saneamiento mejorado tanto en el sector urbano como en el rural (FAO, 2017, FCH, 2016), donde se tratan 3,52 millones de metros cúbicos al día (MOP, 2020), por lo que ya posee la “materia prima” para efectuar dicho proceso de reúso. Es necesario comentar que, si bien en el caso rural el porcentaje de cobertura de saneamiento mejorado es elevado, 91% (FAO, 2017), el concepto hace referencia desde letrinas de pozo, hasta red de alcantarillado, por lo que este valor no quiere decir que el sector rural tenga un saneamiento óptimo, de hecho, según la misma fuente, solo un 19% de la población del sector rural tiene acceso a la red de alcantarillado.

Por otro lado, ya existe un reúso indirecto permanente de las aguas ya que las descargas de las PTAS que cumplen con el DS 90, en aguas superficiales, son reutilizadas aguas abajo por otras empresas, agricultores o individuos para fines varios, con conciencia de que estas aguas fueron tratadas y diluidas naturalmente por el río al cual fueron vertidas.

El reúso ocurre y siempre ha ocurrido (en cierta medida), pero no es una práctica formal y no existen una regulación explícita para su aplicación (FCH, 2016), por lo que se entiende que es necesario establecer procedimientos, metodologías de control, y definir los pasos a seguir para su correcta aplicación, algunos de ellos en la Ilustración 11. El reúso es una gran oportunidad en muchas de sus aristas y, en particular, el reúso del caudal de las descargas de los emisarios submarinos, según la Ilustración 12, podría permitir la generación de una fuente equivalente al 10% de la brecha hídrica nacional, la cual se estima en 82,6 m³/s (Escenarios hídricos, 2018), o el cultivo de 31.000 hectáreas de grandes frutales. Por otro lado, considerando que en Chile las exportaciones de productos agropecuarios generaron un 25% de los envíos, transformándose en el mayor rubro exportador (DIRECON-PROCHILE, 2018), es necesario mencionar que los mercados externos no regulan la calidad de agua con la que se riega, sino que se basan en el control fitosanitario del producto (SAG, 2018), el cual hace referencia al control de plagas o enfermedades que podrían afectar a los productos del país importador, por lo tanto, regar con aguas tratadas no es un impedimento en lo que respecta a las exportaciones.

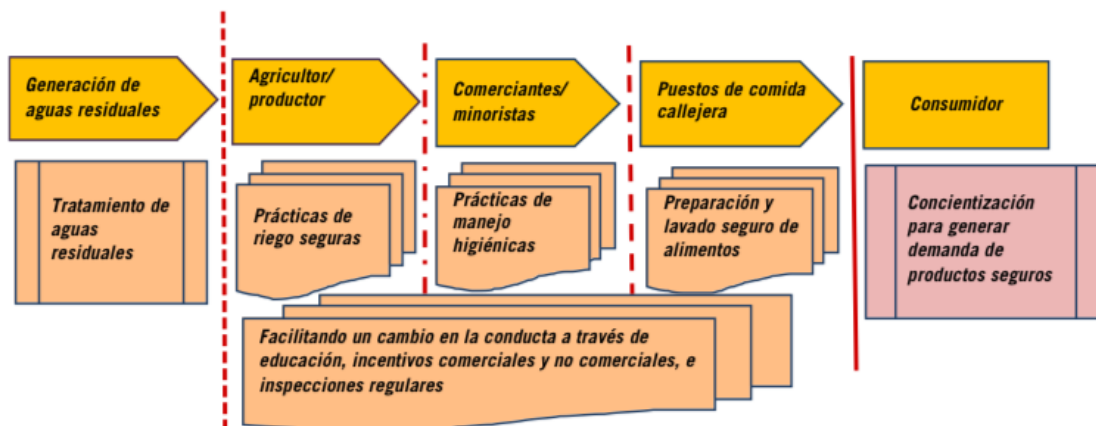


Ilustración 11: Barreras múltiples para reducir riesgo en riego mediante reúso de aguas residuales. Fuente: FAO, 2017.

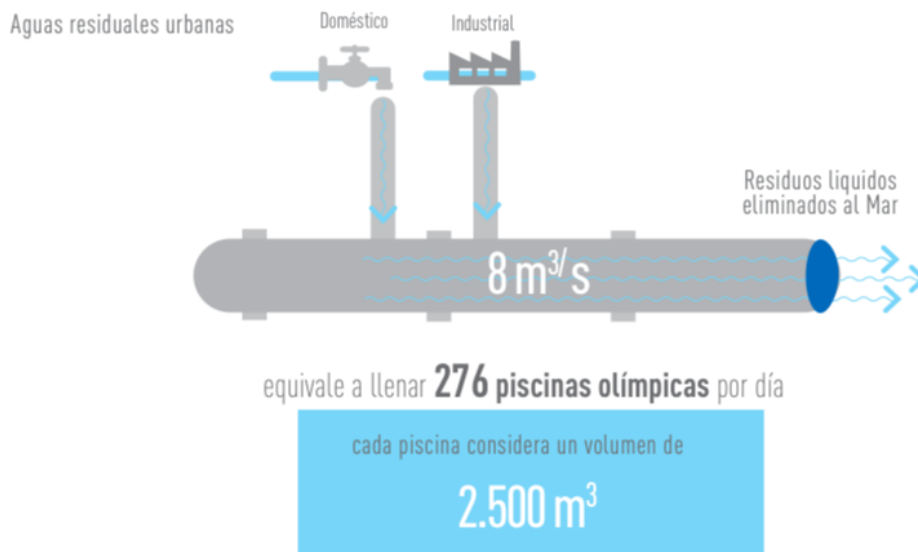


Ilustración 12: Emisarios submarinos a nivel nacional. Fuente: FCH, 2018.

El reúso puede ocurrir a partir de distintas fuentes o calidades, pero dependiendo el caso, es necesario utilizar distintos procesos de tratamiento. En general, para lograr un reúso de emisarios submarinos, es necesario tratarlos nuevamente ya que en general estos solo pasan por un tratamiento primario para cumplir con la Tabla N° 5 del DS 90. Para el caso de descargas a cuerpos superficiales, es necesario un tratamiento primario, secundario y dependiendo el caso, terciario, por lo que solo se debe asegurar la calidad para cumplir con la NCh 1.333 con respecto al riego, entre otras consideraciones que se detallan más adelante en el mismo capítulo. Para el caso de las aguas servidas rurales, si bien su tratamiento no siempre está centralizado, el reúso de este podría proporcionar el recurso para construir pequeños centros de cultivo, generando una fuente de trabajo y alimento.

El primer paso para el reúso en Chile, es la creación de la ley 21.075 que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises (MinSal, 2017), donde se establecen los procedimientos y consideraciones necesarias relacionadas con el reúso de este tipo de aguas, pudiendo utilizarlas en riego de plantas ornamentales, riego de campos deportivos, uso en aguas para el inodoro, entre otras prácticas que no sean riesgosas para la salud. Además, para el sector rural, hoy en día existe un proceso de implementación de la ley 20.998, Regulación Servicios Sanitarios Rurales, la cual entregaría apoyo y asesoramiento en lo que respecta a los sistemas de Agua Potable Rural (APR) y al saneamiento, esto podría en una instancia para aumentar la cobertura y conectividad de saneamiento de los sectores rurales, como también mejorar los métodos de regulación y control de los procesos de tratamiento que ya existen, y que son controlados por comités y cooperativas, donde en algunos funcionan de manera correcta, pero en otros no, y existen ineficiencias o negligencias que afectan en gran medida tanto a las comunidades del sector, como al medioambiente, por lo que la ley en estos casos sería un fuerte apoyo.

Con lo anterior en mente, no estaría fuera de lugar pensar que eventualmente se permita y regule el reúso de aguas residuales o servidas tratadas para el uso en riego

para la producción de algunos tipos de alimentos, de hecho, actualmente se encuentran en discusión las normas NCh 3452 sobre “Reúso de aguas residuales tratadas para riego - Directrices para la adaptación de sistemas y prácticas de riego a aguas residuales tratadas”, la NCh 3456 sobre “Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego - Parte 1: Base de un proyecto de reúso para riego”, la NCh 3482 sobre “Directrices para la evaluación y gestión de riesgos para la salud en el reúso de agua regenerada”, y finalmente la NCh 3483 sobre “Directrices para la clasificación del grado de calidad del agua para el reúso de agua”.

Algunas consideraciones previas a que se emitan dichas normas, sería primeramente compatibilizar la NCh 1.333 con el DS° 90, como también tomar en cuenta las consideraciones con respecto a la contaminación con patógenos de la ley 21.075 de aguas grises, que indica que no es posible utilizar este tipo de aguas para el riego de “frutas y hortalizas que crecen a ras de suelo y suelen ser consumidas crudas por las personas”, o para riego de plantas “que sirvan para alimento a animales que pueden transmitir afecciones a la salud humana”. También se restringe el uso para los procesos productivos de la industria alimenticia, por lo que sería necesario definir primeramente cuales serían las consideraciones especiales que se deberían tener frente al cultivo de ciertos productos, como por ejemplo el riego con sistemas por goteo, que eviten inmediatamente el contacto de la fruta o la parte comestible de las hojas con el agua de riego, evitando así, una posible transmisión de algún elemento potencialmente peligroso para la salud. Los peligros identificados según ruta de exposición e importancia, se muestran en la Tabla 27. Es importante destacar que este peligro no existe en caso de que se aplique el tratamiento correcto y se tomen las medidas necesarias por parte del agricultor y el consumidor. Algunas de ellas detalladas en el Anexo 2.

Luego, algunas consideraciones por tipo de cultivo están definidas y se detallan en FCH, (2018), y se muestran de manera similar, en la Tabla 28.

Tabla 27: Diferentes peligros asociados al uso de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento deficiente en la agricultura. Fuente: Adaptado de OMS (2006), por FAO (2017).

Peligro	Ruta de exposición	Importancia
Bacterias (ej. E. coli, Vibrio cholerae, Salmonella spp., Shigella spp.)	Contacto y consumo	Bajo – Alto
Ascaris, anquilostomas, Taenia spp. y otros helmintos transmitidos a través del suelo.	Contacto y consumo	Bajo – Alto
Schistosoma spp. (helminto)	Contacto	Nulo – Alto
Protozoos (Giardia intestinalis, Cryptosporidium, Entamoeba spp.)	Contacto y consumo	Bajo – Medio
Virus (virus hepatitis A y E, adenovirus, rotavirus, norovirus, entre otros)	Contacto y consumo	Bajo – Alto
Irritantes de la piel	Contacto	Medio – Alto
Patógenos transmitidos por vectores (Filaria spp., virus de la encefalitis japonesa, Plasmodium spp.)	Contacto con vector	Nulo – Medio
Metales pesados y metaloides (arsénico, cadmio, plomo, mercurio)	Consumo	Generalmente bajo
Hidrocarburos halogenados (dioxinas, furanos, PCB’s)	Consumo	Bajo
Pesticidas (aldrín, DDT)	Contacto y consumo	Bajo

Tabla 28: Factibilidad y consideraciones de riego para el cultivo mediante aguas tratadas². Fuente: Adaptado de FCH, 2018.

Consideraciones para riego con aguas residuales tratadas	
Frutales menores	En su mayoría es factible y más aún si es con riego por goteo (superficial, enterrado o cubierto). Las frutillas deben ser regadas con la técnica de camellones elevados y con cobertura de plástico.
Viñas para producción de vino y pisco	Factible y sin restricciones utilizando riego por goteo, microjet o microaspersión.
Hortalizas	Factible según cultivo: Para alcachofas no hay restricciones. Para hortalizas sin contacto con el suelo, se deben utilizar riegos por goteo enterrado o con cubierta superficial, en algunos casos se acepta goteo superficial. Las leguminosas y cucurbitáceas se pueden regar mediante las tres modalidades de riego por goteo. Para hortalizas de consumo de hojas no se recomienda el reúso de aguas tratadas para su irrigación.
Cereales y forrajeras anuales	No se recomienda utilizando riego superficial en suelo dada la posible contaminación del medio ambiente. Su baja rentabilidad no incentiva la implementación de riego tecnificado.
Forrajeras permanentes	Se recomienda para el cultivo de alfalfa mediante riego por aspersión convencional. El secado del forraje al sol fomenta la desinfección de posibles patógenos.
Flores	Factible en toda ocasión. Se recomienda sistemas presurizados de riego con aplicación localizada.
Frutales mayores	Factible sin excepción. Se recomiendan sistemas presurizados de aplicación localizada, especialmente riego por goteo en sus tres modalidades, con mulch plástico u orgánico.

Es necesario indicar que, si bien en la ley 21.075 establece contraindicaciones para el reúso de aguas grises con respecto a los cultivos, en el código sanitario artículo 75° se indica que “las aguas de alcantarillado, desagües, acequias u otras declaradas por la autoridad sanitaria... se podrán usar en el riego agrícola cuando se obtenga la autorización correspondiente del Servicio Nacional de Salud, quien determinara el grado de tratamiento, de depuración o desinfección necesario para cada tipo de cultivo”. Para esta parte, se nombra el decreto 1.775 del año 1995 sobre la aplicación del artículo 75° del Código sanitario, donde se indica un límite máximo de 1.000 coliformes fecales por cada 100 ml de agua, lo cual es también el límite para el DS 90 y la NCh 1.333, y se indica una restricción explícita para los siguientes productos, los cuales crecen al ras del suelo y suelen consumirse crudos:

- Toda especie de lechuga
- Cilantro
- Rábanos y rabanitos
- Frutillas
- Repollo
- Achicorias
- Perejil
- Fresas y fresones
- Apio
- Espinaca

² Para cualquier cultivo con posible contacto directo con el suelo o con el agua reusada tratada, se recomienda cocción para asegurar la desinfección.

Luego, si bien la ley en cierta medida es exigente para las aguas grises y para las consideraciones existentes con respecto a las aguas servidas en general, es necesario recordar que esta es una práctica relativamente nueva en el país, por lo que, en el caso de ser permitido por una ley futura, sería útil tener en cuenta algunas propuestas determinadas por FCH, (2018).

- Capacitaciones para el personal encargado de operación del proceso de tratamiento y mantenimiento, considerando el reúso.
- Comité de APR organizado y actualizado en lo que respecta a normativas y tecnología para el reúso.
- Proximidad entre el lugar de almacenamiento de las aguas residuales tratadas, y el usuario.
- Capacitaciones con respecto al cultivo con aguas residuales tratadas para el usuario.
- Aprovechamiento de infraestructura de tratamiento existente, para solo modificar el tratamiento actual e incluir un estanque de almacenamiento.
- Considerar sistemas de tratamientos naturales como por ejemplo humedales construidos, biofiltros, entre otros, que podrían ser menos sofisticados, pero similarmente eficientes en lo que respecta a la remoción de la carga biológica, metales pesados y otros contaminantes.

Además, las problemáticas mencionadas anteriormente se pueden solucionar mediante la aplicación de un esquema que contempla todas las variables relevantes con respecto a las políticas públicas y a lo que respecta a la organización comunitaria de los agricultores u organismos interesados. En la Ilustración 13 se observa las diferentes interacciones y actividades (FAO, 2011).



Ilustración 13: Visión holística del Desarrollo de Capacidades Institucionales. Fuente: FAO, 2017.

Lo anterior, permitiría de alguna manera cambiar el paradigma existente de que el reúso de las aguas servidas tratadas se relacione estrictamente con un perjuicio a la salud de las personas o animales que tengan contacto tanto directo como indirecto con el agua.

5.2 Reúso en la región de Antofagasta y Coquimbo.

Considerando lo anterior, la pregunta siguiente es si existe suficiente generación de aguas servidas para satisfacer parte de la demanda hídrica del sector agrícola en cada región. Para esto, es necesario considerar que existen principalmente 3 vías de tratamientos: Emisarios submarinos, PTAS urbanas y PTAS rurales. Lo anterior se analiza primeramente para la región de Antofagasta y luego para Coquimbo.

Para el caso de Antofagasta, los caudales relacionados al saneamiento se detallan a continuación:

- **Sector urbano:** En la región existen 7 plantas de tratamiento, de ellas, según lo indicado en la Tabla 29, todas tienen tratamiento preliminar y solo en la provincia de Antofagasta y Calama se tiene un tratamiento secundario. De ellas, 4 tienen un buen funcionamiento, 2 regular y 1 en mal estado. Las tres plantas que se encuentran en estado regular o en mal estado, necesitan remplazo. Luego, un 65% del total es vertido al mar (0,63 m³/s) con previo tratamiento preliminar y el 35% restante, compuesto por la PTAS de Calama y parte de la PTAS en Antofagasta, es tratado mediante lodos activados (ARCADIS, 2016). Es necesario destacar que la planta de Calama, cumple con la Tabla 1 del DS^o 90 (ARRAU, 2012).

Tabla 29: Caudales de aguas servidas a recolectar según territorio operacional en Antofagasta. Fuente: Informe DGA (2016), realizado por ARCADIS.

Territorio operacional	Aguas servidas (lt/s)	Saneamiento
Antofagasta	627,2	Alcantarillado, tratamiento preliminar y emisario submarino. Una parte tiene tratamiento secundario con uso industrial
Calama	259,1	Alcantarillado y lodos activados.
Tocopilla	40,9	Alcantarillado, tratamiento primario y emisario submarino.
Baquedano	1,9	Alcantarillado, tratamiento preliminar y emisario submarino
Sierra Gorda	1,3	Alcantarillado, tratamiento preliminar y emisario submarino
Mejillones	18,6	Alcantarillado, tratamiento primario y emisario submarino.
Taltal	18,8	Alcantarillado, tratamiento preliminar y emisario submarino.
Total	0,97 m³/s	

- **Sector rural**

La región cuenta con un total de 26 sistemas de agua potable rural, pero solo 10 están operativas, considerando que Chiu-Chiu funciona en conjunto con Lasana, y que, la APR Quillagua y Caspana se asumen como no activas. Las APR registradas como operativas se describen resumidamente a continuación. La descripción de estas se obtuvo a partir de ARCADIS, (2016) y AMPHOS, (2017).

- **APR San Pedro de Atacama:** Se utiliza OI para tratamiento de agua potable, ocupando aproximadamente 30 l/s de los 40 l/s que poseen de derechos de aprovechamiento. Por otro lado, posee un 70% de alcantarillado con tratamiento de aguas servidas (no se especifica), y el resto se compone por fosas sépticas. Se abastece de pozo profundo complementado con pozo auxiliar. Existen aproximadamente 7.000 beneficiarios.
- **APR Toconao:** Solo utiliza desinfección y tiene 3.5 l/s de derechos de aprovechamiento de la vertiente Silapeti. En periodo estival se inyecta agua desde la aducción Vilaco. Existen 1.100 beneficiarios.
- **APR Socaire:** Utiliza una planta de tratamiento con intercambio iónico, y tienen aproximadamente 2 l/s de derechos de aprovechamiento de la vertiente Nacimiento. Existen 350 beneficiarios.
- **APR Caspana:** Utiliza solo cloración y tienen 2 l/s de la vertiente Caulor. Posee solo fosa séptica y capta desde Cerro Negro. Beneficia a 250 habitantes.
- **APR Lasana:** Posee abatimiento de arsénico y no tiene información de cuanto utiliza. Según cantidad de habitantes, debería ser del orden de los 0.5 a 1 l/s. Tiene solo fosa séptica y se abastece por aducción Codelco, Linzor. Existen 431 beneficiarios.
- **APR Chiu Chiu:** Abatimiento de arsénico. Utiliza 2 l/s, los cuales son cedidos por la empresa estatal Codelco Norte. Tiene solo fosa séptica. Se abastece por aducción Codelco, Linzor. Existen 1200 beneficiarios.
- **APR Peine:** Se gestiona un proyecto de cloración y utiliza aproximadamente 2 l/s de los 30 l/s que poseen como derechos de aprovechamiento. Beneficia a 600 habitantes.
- **APR Caleta Paposo:** Sin información de caudal. Atiende a 450 habitantes. Es por captación de agua de mar y se trata por OI. Posee fosas sépticas y minoría con pozo negro.
- **APR Quillagua:** Atiende a solo 120 habitantes mediante camión aljibe. Tiene solo fosa séptica.
- **APR Ollagüe:** Sin información de caudal, atiende a aproximadamente 300 habitantes mediante captación desde vertiente Escalera.

- **APR Chunchurri:** No tiene información de caudal, atiende a 295 habitantes, con un sistema de tratamiento con cloración y sistema de evacuación mediante pozo negro. Se abastece a partir de la red de aguas Antofagasta de Calama.
- **APR Toconce:** No tiene información de caudal, atiende a 100 habitantes mediante una planta de tratamiento de adsorción de arsénico y utiliza pozos negros y fosas sépticas como sistema de evacuación. Se abastece por aducción Linzor.
- **APR Camar:** atiende a 50 habitantes mediante una planta de OI. Sin información de sistema de evacuación ni de caudal.

En conjunto, todas las APR benefician a 11.876 habitantes, con distintas fuentes y procesos de tratamiento. Luego, la única APR que tiene sistema de alcantarillado es la de San Pedro de Atacama, donde si se considera una recolección del 85% de los derechos que posee, esta podría recolectar entre 17,9 y 24 lt/s.

Para el caso de la región de Coquimbo, el panorama es el siguiente:

- **Emisarios Submarinos:** Entre tres emisarios submarinos, uno en La Serena, otro en Coquimbo y el último en Los Vilos, descargan al mar $0,78 \text{ m}^3/\text{s}$ como promedio anual. (SISS, 2015).
- **PTAS sector urbano:** Existen 20 PTAS, donde 10 son de lodos activados, 8 lagunas aireadas, una laguna facultativa y una con sistema de lombrifiltros. Estas 20 plantas generan un efluente aproximado de $0,32 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y cumplen con la Tabla 1 del DS 90. El 45,5% del caudal lo aporta la PTAS de Ovalle, un 14,6% la PTAS de Illapel, un 10,1% la PTAS Salacanca y el 29,8%, las 18 PTAS restantes, de las cuales 10 son por lodos activados. (FCH, 2018).
- **PTAS sector rural:** Un catastro realizado por la SUBDERE el año 2014, estima que existen en la región 71 PTAS rurales con 69 sistemas de lodos activados, una con sistema de lombrifiltros y un sistema de lagunas aireadas. De las 71, 27 funcionan en buenas condiciones, 22 en forma regular, 13 en malas condiciones y de las 9 restantes no se tiene registro. Además, 69% está bajo el régimen de cooperativas y/o APR, un 24% bajo la administración de municipios, 6% son mantenidas por juntas de vecinos y el 1% restante no se tiene registro. Se estima que existe un efluente tratado de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}$. (FCH, 2019).

Las principales problemáticas que determinan la condición de las PTAS rurales en estado “regular” son por problemas operacionales y mantenimiento (19,7%) y por falta de financiamiento con, además, problemas O&M (11,3%). Luego, las asociadas a la condición de “malas”, son por problemas O&M (5,6%), O&M y falta de financiamiento, y finalmente, por problemas O&M, tecnología de tratamiento inadecuada y mal dimensionamiento (11,3%).

En resumen, entre las tres vías de tratamiento se estima una generación de 36,39 millones de metros cúbicos por año en la región, valor equivalente a 1,154 metros cúbicos

por segundo, lo cual sería un 7,9% de la demanda agrícola según el resumen de demandas hídricas para Coquimbo en el año 2015 (DGA, 2017).

Finalmente, en la región de Coquimbo existe un proyecto de reúso, el cual permite usar las aguas servidas tratadas de una planta de tratamiento, y utilizarlas como una fuente de agua para riego.

Experiencia en la provincia del Limarí, región de Coquimbo

En la localidad de Cerrillos se construyó una PTAS de aproximadamente 1.000 metros cuadrados, a partir del financiamiento otorgado por un Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Se administra por un comité de APR, tratando las aguas de 2.900 habitantes, mediante el proceso de lodos activados, generando un efluente tratado (cumpliendo el DS 90) de 6 l/s. Esta planta, además, se encuentra cerca de terrenos agrícolas aptos para el cultivo, posee un operador permanente, y cuenta con un sistema de acumulación de 3.000 metros cúbicos.

Lo anterior permite generar un sistema de riego intermitente para aproximadamente 6 hectáreas, cumpliendo con la normativa de calidad según el DS⁹⁰ y la NCh 1.333. Para este caso se escoge como cultivo la alfalfa, ya que se utiliza para alimentar animales, y se utiliza un sistema de riego por aspersión, lo cual es coherente con la tabla 28.

Este proyecto “piloto”, entrega luces sobre la capacidad de riego que se tiene para el futuro si se consideran todas las plantas de tratamiento de aguas servidas rurales, donde por cada litro por segundo, se podría regar aproximadamente 1 hectárea. De todas maneras, el potencial dependerá del tipo de suelo, capacidad de almacenamiento, riego, condiciones externas como el viento, temperatura, entre otros, y el tipo de cultivo, que determina el coeficiente de cultivo.

Análogo al caso de PTAS rural, los emisarios submarinos, dado su gran caudal, podrían ser una fuente importante del recurso hídrico, y, en consecuencia, una oportunidad para el reúso. Para el caso particular de Coquimbo, un caudal de 0.78 m³/s podría alcanzar para 780 hectáreas de cultivos en suelo. Es necesario recordar que estos solo tienen tratamiento preliminar, por lo que se debe añadir un tratamiento secundario, y en caso de ser necesario, terciario.

5.3 Tratamiento de aguas residuales en contexto de reúso.

Para lograr un reúso correcto de las aguas servidas tratadas, es necesario lograr cumplir tanto con la norma 1.333 con respecto al riego, como también los parámetros establecidos en la sección anterior, por ejemplo, una cantidad menor a un NMP 1000 coliformes fecales cada 100 ml. Para lograr esto, es posible utilizar procesos convencionales, como también sistemas no convencionales. Para el segundo caso, en esta memoria se considera la fitorremediación como una alternativa.

5.3.1 Procesos convencionales de tratamiento de las aguas residuales

Dado que la calidad de las aguas residuales es muy distinta a la de las aguas naturales, los procesos de tratamiento también lo son. El agua residual se depura mediante procesos de tratamiento primarios, secundarios y terciarios, donde para el primario se remueven sólidos en suspensión, grasas, aceites, entre otros, para el tratamiento secundario se realiza una remoción de contaminantes biodegradables mediante procesos biológicos, y con respecto al terciario, se utilizan procesos de tratamiento para remover elementos específicos.

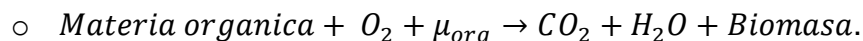
Tratamiento primario

Este proceso de tratamiento, permite la reducción de sólidos en suspensión y acondicionar el agua para el tratamiento secundario. Se divide principalmente en procesos físicos y químicos. Con respecto a los físicos, se encuentra el desbaste (remoción de sólidos gruesos), desarenado (separación de partículas pequeñas de alta densidad), sedimentación (remoción de sólidos en suspensión entre 1 mm – 1 m), y de flotación (remoción de grasas y aceites mediante burbujas de aire o solo por diferencia de densidad). Luego se encuentra el proceso químico, el que se relaciona con las reacciones de coagulación/floculación³ que consisten en la alteración de propiedades físico/químicas de las partículas para fomentar la formación de flóculos (aglomeración de partículas en suspensión) y acelerar su decantación.

Tratamiento secundario

Su objetivo es la de degradación de materia orgánica mediante sistemas biológicos, reduciendo así, la demanda de oxígeno disuelto. En general, se utilizan procesos aeróbicos y anaeróbicos, pero también existen otros que contemplan el uso de biodiscos, lombrifiltros, humedales construidos (sistema complejo, se comenta en una sección posterior), entre otros.

- **Proceso aeróbico:** Mecanismo de remoción de materia orgánica mediante microorganismos aeróbicos (μ_{org}). Debido a lo anterior, requieren de aireadores que permitan la incorporación de oxígeno, por lo que se caracteriza por tener un consumo eléctrico elevado. El proceso de lodos activados funciona mediante este principio, utiliza primeramente un reactor aeróbico y luego un clarificador. En ocasiones, como se observa en la ilustración 14, se acopla un clarificador antes del reactor. La ecuación que gobierna estos sistemas es la siguiente:



³ Coagulantes utilizados comúnmente serían $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$, $AlCl_3$ polimerizado.

Floculantes orgánicos utilizados comúnmente serían polímeros cargados derivados de la celulosa, poliaminas, almidones cuaternarios, Quitosan y taninos condensados.

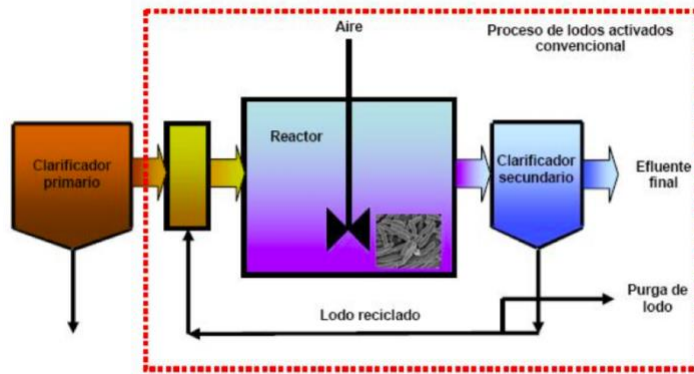


Ilustración 14: Representación gráfica de un proceso convencional de lodos activados. Fuente: Adaptado de Ramalho, 1996, por TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.

- **Proceso anaeróbico:** Mecanismo de remoción de materia orgánica mediante reacciones bioquímicas que generan biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S o H_2), en ausencia de oxígeno según la fórmula:



El proceso ocurre dentro de reactores con microorganismos, los cuales pueden estar tanto en la zona líquida, formando flóculos, como también adheridos en soportes sólidos. Estos compuestos gestionados correctamente pueden generar energía. Es necesario destacar que la puesta en marcha es delicada debido a la necesidad de esperar por el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Posee un alto tiempo de retención hidráulico y una alta tasa de producción de biogás. Los más utilizados por simplicidad son los digestores de mezcla completa y flujo pistón, pero también se pueden utilizar para bajas cargas, por ejemplo, digestores RAFA (UASB), el cual se observa en la Ilustración 15.

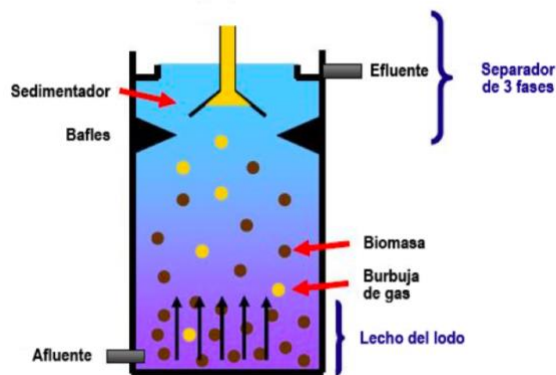


Ilustración 15: Esquema de reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Fuente: TECSPAR en Manual de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas.

Ambos procesos permiten remover la materia orgánica, con la diferencia de que el proceso aeróbico requiere energía para el funcionamiento del sistema de oxigenación, genera más lodo que el proceso anaeróbico, y estos deben ser tratados posteriormente. El proceso anaeróbico genera lodos estabilizados, y es posible utilizar el biogás obtenido por el proceso de degradación para producir energía en forma de calor o electricidad, pero la calidad del efluente tratado es menor que en el caso de los lodos activados.

En las Tablas 30 y 31 se muestran algunos valores y comparaciones con respecto al sistema de lodos activados, en relación a los costos, eficiencias de remoción para DBO₅, (las remociones para los sólidos en suspensión son en la mayoría idénticas a las de la DBO₅) y espacio requerido para distintos procesos de tratamiento secundarios, incluyendo el sistema de humedal construido comentado en el punto 6.3.2. Es necesario considerar que las remociones entre, por ejemplo, sistemas de lagunaje o humedales construidos y lodos activados, no son directamente comparables para ciertas escalas ya que los requerimientos de espacio son extremadamente distintos y poseen distintas propuestas de valor. Además, con respecto a las lagunas de estabilización, si bien poseen bajo costo de obra civil, operacional, de mantenimiento y baja necesidad de capacitación de operadores, estos poseen altos requerimientos de terreno y rendimientos menores comparado con un tratamiento de lodos activados.

Tabla 30: Comparación de costo, eficacia y espacio requerido de distintos sistemas de tratamientos de aguas servidas. Fuente: Libhaber, Orozco-Jaramillo (2012).

Proceso	Capacidad remoción DBO ₅	Costo de inversión		Costo de Operación y mantención		Espacio promedio requerido	
	% DBO ₅ removido	US\$/per	% relativo lodo activado	US\$/año/per	% relativo lodo activado	m ² /per	% relativo lodo activado
Reactores RAFA (UASB)	60 – 75	20 – 40	25 – 40	1,0 – 1,5	19 – 25	0,03 – 0,1	35
Filtros anaerobios	70 – 80	10 – 25	10 – 25	0,5 – 1,0	13 – 20	0,03 – 0,1	35
Lagunaje convencional	70 – 90	20 – 40	25 – 40	0,2 – 0,4	5 – 8	3 – 5	2.160
Lagunas anaerobias cubiertas seguido de lagunas facultativas con mezcladores	80 – 95	20 – 50	25 – 50	0,2 – 0,4	5	1,5 – 2	950
Humedal construido	80 – 90	20 – 30	20 – 30	1,0 – 1,5	19 – 25	1,5 – 5	1.750
RAFA-filtro anaeróbico	80 – 90	20 – 40	20 – 40	1 – 1,5	19 – 25	0,05 – 0,15	54
RAFA – Lagunaje	80 – 90	30 – 50	30 – 50	1 – 1,5	19 – 25	1,5 – 2,5	1.080
RAFA – Filtro arena	80 – 90	30 – 50	30 – 50	1 – 1,5	19 – 25	0,05 – 0,15	54
Lodos activados	80 – 90	100 - 150	100	4 – 8	100	0,12 – 0,25	100

Tabla 31: Comparación entre tratamientos biológicos para aguas residuales. Fuente: Conagua, 2015.

Tipo de tratamiento	Ventajas
Filtros biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Altas eficiencias de remoción, 75-85 por ciento de sólidos en suspensión y microorganismos 95-99 por ciento • Efluente parcialmente nitrificado. • Efluente para reúso agrícola • Menos requerimiento de equipo electromecánico
Lagunas de estabilización	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo por obra civil • Bajo costo de operación y mantenimiento • Capacitación nula de operadores
Lodos activados	<ul style="list-style-type: none"> • Altas eficiencias de remoción 85-95 por ciento de sólidos en suspensión y microorganismos 98-99.5 por ciento • Lodos parcialmente estabilizados • Efluente parcialmente nitrificado • Fácil de estabilizar durante arranque
Humedales artificiales	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve hasta 70 por ciento de sólidos y bacterias

Tratamiento terciario

Procesos específicos como los mencionados en el capítulo 5.1. Algunos de ellos, ordenados por tipo de contaminante que remueve según proceso, se muestran en la Tabla 32. Además, la descripción de algunos tratamientos terciarios y como algunos parámetros afectan su funcionamiento, se encuentran en los Anexos 3, 4, 5, 6 y 7.

Tabla 32: Tipos de procesos de tratamiento y los contaminantes que usualmente remueve. Fuente: Conagua, 2015.

Proceso	Sólidos suspendidos	Coloides	Materia orgánica	Materia orgánica disuelta	Nitrógeno y fósforo	Constituyentes traza	Sólidos disueltos totales	Bacterias	Protozoos y helmintos	Virus
Tratamiento secundario	X			X						
Secundario con remoción de nutrientes				X	X					
Filtración profunda	X							X	X	
Filtración superficial	X		X					X	X	
Microfiltración	X	X	X					X	X	
Ultrafiltración	X	X	X					X	X	X
Flotación de aire disuelto	X	X	X						X	X
Nanofiltración			X	X		X	X	X	X	X
Osmosis inversa				X	X	X	X	X	X	X
Electrodialisis		X					X			
Carbón activado				X		X				
Intercambio iónico					X	X	X			
Oxidación avanzada			X	X						
Desinfección			X					X	X	X

5.3.2 Fitorremediación de aguas residuales mediante humedales construidos: Características y consideraciones.

Los humedales construidos son ecosistemas acuáticos generalmente constituidos por un suelo húmedo y vegetación, que permiten captar y reciclar nutrientes, generar hábitats, controlar y amortiguar inundaciones, entre otras funciones. Según el tipo de flujo del humedal, es posible definirlo como de flujo superficial o flujo subsuperficial. Los humedales de flujo superficial se caracterizan por ser un sistema abierto, donde el agua escurre por sobre el sustrato, por lo que se observa a simple vista, es poco profundo, con tiempos de retención hidráulicos de al menos 10 días, donde el suelo cumple la función de ser el medio de soporte para las plantas (no de medio filtrante). Por otro lado, el sistema de flujo subsuperficial, posee una mayor profundidad, y el agua escurre entre la matriz porosa del sustrato, el cual puede ser de arena gruesa, gravilla, u otro material como la zeolita (San Miguel-Espinosa et al. (2019). En la ilustración 16 es posible observar de arriba hacia abajo un humedal construido de flujo superficial, y uno de flujo subsuperficial respectivamente.

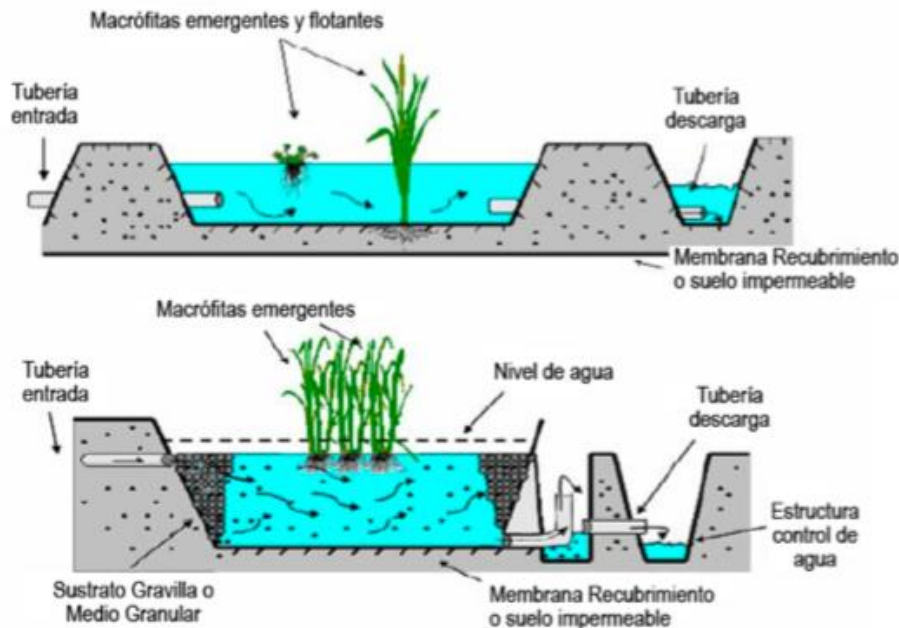


Ilustración 16: Humedal de flujo superficial (arriba) y sub-superficial (abajo). Fuente: Vidal, G., Jarpa, M., Plaza, C., Belmonte, M., Mariangel L. (s.f.)

Estos sistemas, surgen como una alternativa atractiva con respecto al tratamiento de algunos contaminantes como metales pesados, materia orgánica, surfactantes, sólidos suspendidos, entre otros, pero es necesario considerar que necesitan una superficie entre 20 y 80 veces superior (o más) comparados con tecnología convencionales de tratamiento (Vidal, G. et al., s.f.). Es una tecnología compleja en la cual participan procesos de fitoextracción, fitoestabilización, fitodegradación, fitovolatilización, rizofiltración y rizodegradación para la remoción de los contaminantes. En la Tabla 33 se definen brevemente los procesos:

Tabla 33: Procesos que participan en la fitorremediación. Fuente: Hermen, S. (2011), Greipsson, S. (2011)

Proceso	Definición
Fitoextracción	La vegetación absorbe los contaminantes con sus raíces desde el suelo hasta alguna zona superior de la planta, tallo u hojas. Se utilizan plantas hiperacumuladoras e involucra cortar y cosechar para la remoción
Fitoestabilización	Las raíces y microorganismos de la planta inmovilizan los contaminantes orgánicos y algunos inorgánicos mediante la unión de estos a las partículas de suelo o procesos de precipitación, complejación y sorción en raíces.
Fitodegradación/Rizodegradación	Proceso de degradación de contaminantes orgánicos debido al contacto con enzimas liberadas por las raíces o mediante la actividad metabólica dentro del tejido vegetal.

Tabla 33: Procesos que participan en la fitorremediación. Continuación. (Hermen, S. (2011), Greipsson, S. (2011))

Proceso	Definición
Fitovolatilización	Algunas plantas pueden extraer ciertos contaminantes desde el suelo y luego liberarlos a la atmósfera por volatilización.
Fitofiltración	Las raíces (rizofiltración) o las plántulas (blastofiltración) extraen contaminantes mediante procesos de adsorción o absorción. Además, ocurre precipitación de contaminantes en la rizósfera.

Las diferentes partes de las plantas pueden afectar el entorno de distintas maneras, aportando a que los procesos definidos anteriormente se puedan llevar a cabo. Primeramente, la parte aérea de la planta aporta a la generación de un microclima que permite un aislamiento durante el invierno, reduce la velocidad del viento, lo cual disminuye el riesgo de resuspensión, permite también el almacenamiento de nutrientes y finalmente genera un valor estético. Para la parte de la planta que está en contacto con el agua, aporta al proceso de filtrado, reduce la velocidad del flujo permitiendo la sedimentación y reduciendo el riesgo de la resuspensión, excreta el oxígeno de la fotosíntesis, lo cual incrementa la degradación aeróbica, además capta nutrientes y permite el crecimiento de un biofilm. Finalmente, las raíces y rizomas en el sedimento permiten la estabilización del suelo disminuyendo la erosión, en los humedales verticales impide la obstrucción del flujo, aporta una superficie para el crecimiento vertical, libera oxígeno, capta nutrientes y libera antibióticos y otros compuestos (Vymazal, J., 2011).

Los humedales construidos poseen la gran ventaja por sobre otros procesos de tratamiento ya que tienen la capacidad de depurar una amplia variedad de tipos de aguas con distintas calidades, donde, dependiendo del tipo de sustrato con el cual se construye, el tipo de vegetación que se utilice, podría llegar a presentar eficiencias de remoción bastante prometedoras, algunas de ellas en Tabla 34. Estos sistemas naturales se han utilizado a lo largo de los años como sistemas de control y estabilización de efluentes en muchas partes del mundo, como también en aplicaciones a pequeña escala, como tratamiento primario y secundario de aguas servidas de un hogar, o para tratamiento de caudales importantes originados por drenajes mineros (efluentes más dañinos para el medioambiente) removiendo metales pesados y otros contaminantes (Sheoran, A.S., Sheoran, V., 2005).

En estos sistemas ocurren una gran variedad de procesos físicos, biológicos y químicos, que involucran la filtración, adsorción, precipitación, co-precipitación, asentamiento, actividad biológica, entre otros, y existen diversos sectores industriales que han experimentado e implementado con éxito el uso de los humedales construidos para el tratamiento de efluentes del procesamiento de los alimentos, de la agricultura, aguas municipales y domésticas, efluentes industriales, lixiviados, entre otros. Luego, aun cuando existen diversas aplicaciones, las eficiencias de remoción varían enormemente según las concentraciones iniciales, el tipo de planta (Vymazal, J., 2011), si es que existe, el sustrato, y los parámetros hidráulicos del humedal, como el caudal, tiempo de retención, área, entre otros. En la Tabla 34, se muestran las concentraciones iniciales y finales para la DBO_5 en miligramos por litro, según el área y caudal para 9 humedales en distintos lugares del mundo, donde es posible observar que las eficiencias de remoción pueden llegar a ser muy distintas según el diseño:

Tabla 34: Ejemplos de tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas, mediante humedales construidos de flujo horizontal sub-superficial. Fuente: Vymazal, J. (2009).

Localidad	País	Área [m ²]	Caudal [m ³ /d]	DBO ₅ [mg/l]		Remoción [%]
				Entra	Salida	
Wigmore	Reino Unido	328	87	5,8	1,1	81,0%
Onsov	Republica Checa	2100	92	5,9	2,7	54,2%
Leek Wootton	Reino Unido	825	306	8,5	2,3	72,9%
Bear Creek, AL	USA	2035	14,9	9,4	1	89,4%
Pisgah	Jamaica	90	0,9	27	13	51,9%
Lifosa	Lituania	3780	180-400	51	7,8	84,7%
Baggiolino	Italia	96	6	81	7,2	91,1%
Uggerhalne	Dinamarca	2640	103	115	6	94,8%
Agronomica	Brasil	450	6.6	979	19	98,1%

En Chile, el mecanismo Biotreat fomentado por la Fundación Chile propone un tratamiento que utiliza la simbiosis entre un sistema de humedal artificial y un sistema microbiológico de tratamiento. El caso de estudio indica que, con un área de 3.600 metros cuadrados, un rango operacional de caudal de 4 a 100 m³/día, con tiempos de retención de 10 días, permite la reducción de la DBO₅ en 250 mg/L. Por otro lado, una superficie de 80 m² y otra de 70 m², un volumen operacional de 20 a 30 m³ y otro de 30 m³, un tiempo de retención hidráulico de 5 días para cada uno, reduce la DBO₅ en 250 mg/L en ambos. Esta tecnología permite reducir, además, la demanda química de oxígeno (DQO), concentración de sólidos suspendidos totales (SST), color, turbidez en más de un 90%, una remoción de nitrógeno total (NT) de 66% y una estabilización del pH a 6.56. (Vidal, C., 2015).

Por otro lado, los humedales construidos también permiten la remoción de contaminantes específicos como el boro, arsénico (aunque este no está presente en altas concentraciones en las aguas servidas), y potencialmente otros metales pesados. Es necesario comentar que las aguas servidas poseen un bajo contenido de arsénico, dado que este elemento es removido durante el proceso de potabilización.

Para el caso del arsénico se determina la remoción As del agua de rechazo de un proceso de osmosis inversa (Corroto, C., Iriel, A., Fernández, A., Pérez, A.L., 2019). En este caso, se remueve entre un 30% y 80% utilizando *Juncus effusus*, y entre 10% y 40% utilizando *Cyperus haspan*, considerando una concentración inicial de 85 µg/L a un caudal de 36 l/día. Se logra destacar del estudio que *J. effusus* presenta un buen desempeño en invierno (*C. haspan* presenta bajo rendimiento en invierno) y almacena una mayor cantidad de As en las raíces que en la parte aérea, por lo que se desprende que el proceso que determina la remoción es la fitoestabilización. Luego, otros estudios experimentales demuestran que existe remoción de arsénico del orden del 50% utilizando *E. Macrostachya* (Guadalupe, C. 2019). Por otro lado, se identifica que la presencia de sustrato tipo zeolita o arena no altera esta remoción, y que el humedal con la presencia de esta macrófita es capaz, además, de remover entre un 75% y un 90% de DQO.

Con respecto al boro, experimentos que utilizan macrófitas como *Typha angustifolia* y *Puccinellia frígida* con sustrato de cascara de arroz (San Miguel-Espinosa

et al. 2019), registran remociones de aproximadamente un 40%. Se destaca que la remoción fue por parte del sustrato y no por las macrófitas. La experiencia registra además una remoción de sulfato cercano al 68%.

Para metales pesados, un estudio determina que la macrófita *Phragmites Australis* incorpora Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn (Bonanno, G., Lo Giudice, R., 2010), donde las concentraciones acumuladas en la planta se distribuyen de manera que es mayor en las raíces, luego menor para el rizoma, las hojas y mínimo en el tallo. Por otro lado, se encuentran diferencias en el almacenamiento entre metales en las diferentes zonas de la planta, por lo que la movilidad de cada uno de estos es diferente. Lo anterior podría ser útil como una alerta de presencia de contaminantes en el agua o como para su remoción utilizando esta propiedad de acumulación. Las eficiencias de remoción de metales traza aumentan en presencia de micro campos eléctricos, alterando la estructura molecular de las comunidades microbianas y aumentando la abundancia de microorganismos tolerantes a estos contaminantes (Zhihao et al., 2019).

Es necesario destacar que, si bien se ha determinado que algunas plantas pueden remover metales pesados del medio acuático, hay que considerar que no todas funcionan de la misma forma, ni retiran los mismos contaminantes con la misma eficiencia. Además, condiciones ambientales como la temperatura, la estación del año, o del sistema, como saturación del sustrato, bacterias presentes, entre otros, pueden alterar seriamente su capacidad de remoción. Afortunadamente, en el caso de tratamiento de aguas residuales, los metales constituyen un factor de riesgo.

Los humedales construidos se comportan de manera compleja según su disposición, la combinación entre el sustrato con el cual se construye y la macrófita utilizada. Es posible determinar que los humedales construidos si permiten remover una gran variedad de contaminantes de las aguas, y pueden ser utilizados como un proceso regulador frente a la inyección de contaminantes en el medioambiente. Los estudios indican finalmente que estos sistemas permiten remover una gran variedad de contaminantes, a pequeña escala poseen un costo competitivo con respecto a otras tecnologías de tratamiento (0.23 USD por metro cubico tratado, según Vidal, C. en su presentación de la FCH en el año 2015, o entre 1 y 1,5 según Tabla 30) y su efectividad en general es elevada. Por otro lado, no se debe olvidar que el tratamiento de aguas mediante humedales construidos es una práctica relativamente nueva en Chile, y aún existe la necesidad de estudiar el comportamiento de estos sistemas frente a contextos desfavorables. Además, su costo de inversión está fuertemente relacionado con el valor del terreno utilizado, por lo que, para grandes caudales, lo que implica una mayor superficie, este factor es de gran importancia.

Para el diseño de estos sistemas naturales es posible recomendar cargas hidráulicas entre 0,7 y 5 cm/día para humedales de flujo superficial, con una profundidad menor a 0,4 metros, y una carga hidráulica de 2 – 20 cm/día para humedales de flujo subsuperficial, con una profundidad menor a 0,6 metros. Por otro lado, existen parámetros de diseño que indican que el área específica de tratamiento es de 0,5 – 20 hectáreas por cada 1000 metros cúbicos tratados al día, pero, para lograr acotar la superficie requerida, se muestran en la Tabla 35 las fórmulas para el cálculo del área superficial y transversal del humedal horizontal de flujo subsuperficial. Además, se detallan los parámetros típicos para el cálculo.

Tabla 35: Parámetros de diseño para humedales construidos horizontales de flujo subsuperficial y superficial. Fuente: Sun, G., & Cooper, D. (2008); Kadlec, Robert & Wallace, Scott. (2008)

Tipo de humedal	Fórmulas	Parámetros
Humedal horizontal de flujo subsuperficial	$A_h = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_1)}{K_{DBO}}$ $K_{DBO} = K_{DBO_{20}} * (1,1)^{t-20}$ $A_c = \frac{Q}{K_f * \frac{dH}{ds}}$	$A_h = \text{Área superficial del humedal (m}^2\text{)}$ $Q = \text{Caudal a tratar } (\frac{\text{m}^3}{\text{día}})$ $C_0 = \text{Concentración DBO}_5 \text{ en afluente } (\frac{\text{mg}}{\text{l}})$ $C_1 = \text{Concentración DBO}_5 \text{ en efluente } (\frac{\text{mg}}{\text{l}})$ $K_{DBO} = \text{Tasa de remoción de DBO}_5 \text{ } (\frac{\text{m}}{\text{d}})$ $K_{DBO_{20}} = \text{Tasa remoción de DBO}_5 \text{ a } 20 \text{ } ^\circ\text{C } (\frac{\text{m}}{\text{d}})$ $t = \text{Temperatura } (^\circ\text{C})$ $A_c = \text{Área transversal del humedal (m}^2\text{)}$ $Q = \text{Caudal a tratar } (\frac{\text{m}^3}{\text{día}})$ $K_f = \text{Conductividad hidráulica del medio}$ $\frac{dH}{ds} = \text{Pendiente de base } (\frac{\text{m}}{\text{m}})$

Valores utilizados de $K_{DBO_{20}}$: $K_{DBO_{20}} = 0,083 \pm 0,017 \text{ m/d}$; $K_{DBO_{20}} = 0,0699 - 0,1 \text{ m/d}$; $K_{DBO_{20}} = 0,0829 \pm 0,0151 \text{ m/d}$

Valor utilizado para pendiente $\frac{dH}{ds} = 0,5 - 2\%$

Valor comúnmente utilizado para la conductividad hidráulica: 86 – 260 m/día.

6 Propuesta integral: Sistema hidropónico utilizando aguas servidas tratadas.

Se comentaron métodos y alternativas para lograr una mejora de la agricultura para la zona norte del país, pero luego de entender el problema de manera cabal, se encuentra la necesidad de construir una solución que integre un aumento en la oferta hídrica para el riego, una mejora en la calidad de las aguas, y una mejora en los suelos que permita generar una solución del suelo pertinente al tipo de cultivo que se requiera. Debido a que cada una de estos métodos y alternativas corrigen la problemática de manera parcial, es necesario encontrar una propuesta que la aborde en todas sus dimensiones.

La propuesta de este trabajo es el uso de sistemas hidropónicos con aguas servidas tratadas, donde las aguas servidas tratadas podría considerarse una nueva fuente, generando el aumento de la oferta hídrica y una calidad suficiente para el crecimiento de los cultivos, y el sistema hidropónico cumpliría la función del suelo, abordando la problemática de la deficiencia en la calidad de estos en la zona, y fomentando el uso óptimo del recurso hídrico.

De manera complementaria, se recomienda aprovechar la ley 18.450 sobre el fomento a la inversión privada en obras de riego y drenaje, la cual permite bonificar la construcción de proyectos de una obra de riego y/o drenaje, dentro de ellos, proyectos que permitan la tecnificación en la aplicación del agua de riego, como también proyectos de calidad de aguas, que prevengan la contaminación, o permitan mejorar la calidad de las aguas utilizadas para el riego.

6.1 Aplicación: Reúso de aguas servidas tratadas.

Hoy en día, en Chile, ya existen experiencias sobre el reúso de aguas tratadas, como por ejemplo en Cerrillos de Tamaya, en la región de Coquimbo, donde se riega alfalfa con el agua servida tratada por la planta de tratamiento de la zona. Experiencia que entregó resultados positivos, y otorga luces de que, tanto las aguas grises como las negras, pueden ser tratadas para su uso en riego, y que la tecnología permite obtener la calidad necesaria para cumplir con la norma chilena 1.333.

Para un mejor análisis, en la Tabla 36 se divide lo que respecta al reúso de aguas servidas tratadas en Antofagasta y Coquimbo según el sector urbano y rural, y se comparan mediante 6 atributos.

Tabla 36: Análisis comparativo entre una propuesta de reúso en el sector urbano y el rural. Elaboración propia.

Atributo comparativo	Sector urbano	Sector rural
Distribución sistemas de tratamiento	Generalmente centralizados	Generalmente descentralizados
Tipo de saneamiento existente en PTAS	En Coquimbo se utiliza tratamiento por lombrifiltros, lodos activados, lagunas aireadas y lagunas facultativas. En Antofagasta solo hay tratamiento secundario en la Provincia de Calama, y Antofagasta, en el resto, preliminar y primario con emisarios submarinos.	En Coquimbo existen sistemas de lodos activados, lombrifiltros y un sistema de lagunas aireadas, pero, prácticamente un 50% de las PTAS funciona con algún problema. Por otro lado, en Antofagasta la mayoría funciona con fosa séptica y algunos con pozo negro.
Oferta de agua tratada por PTAS	Depende de la población. Para Antofagasta y Coquimbo es del orden de cientos de litros por segundo, incluyendo emisarios submarinos, 0,97 m ³ /s y 1,1 m ³ /s respectivamente. Detalle en capítulo 6.2.	Depende de la población. Para Antofagasta y Coquimbo es del orden de decenas de litros por segundo, 18 – 24 l/s y 54 l/s respectivamente. Detalle en capítulo 6.2.
Ventajas relacionadas a la construcción de un sistema de cultivo hidropónico con aguas servidas tratadas.	Pre-existencia de plantas (solo se requiere acoplar un sistema de reúso). Generalmente las PTAS son más eficientes. Se aprovecha la economía de escala. La PTAS asegura la calidad del efluente. Además, esta frecuentemente fiscalizada por la SISS. Caudales constantes. Podría llegar a ser menos costoso, dado que se solo se construye un sistema de cultivo hidropónico. Se aprovecha la economía de escala. Aplicable para grandes poblaciones. Mayor control y capacidad de mantención y monitoreo del sistema de cultivo. En Antofagasta se tiene tratamiento por OI para agua potable, por lo tanto, en las aguas servidas se tendrán niveles bajos de boro, arsénico, entre otros.	Caudales menores, lo cual facilita el tratamiento y disminuye el riesgo ambiental. Existe menor necesidad de construir extensos sistemas de conducción para conectar PTAS con un sistema de cultivo hidropónico. Disminuyen los requerimientos de agua para transportar residuos sólidos para el tratamiento. Pueden ser construidos por etapas (Comisión Nacional de Agua, 2015).
Dificultades relacionadas con la construcción de un sistema hidropónico regada con aguas servidas tratadas.	La construcción está sujeta al plan regulador. Dada la proporción, se estima una elevada inversión inicial. Para la construcción de un sistema de cultivo hidropónico es necesario desembolsar una gran parte del dinero en el terreno, dado que estos son más caros en la zona urbana.	Debido a la lejanía entre localidades, se deben construir más PTAS, lo que implica una mayor necesidad de monitoreo, mantención e inversión. Generalmente hay menores eficiencias y no se aprovecha la economía de escala. Inexistencia o falta de conducción de aguas servidas hacia un punto de tratamiento. Bajo porcentaje de la población con sistema de alcantarillado y caudales no constantes durante el día.

Considerando lo anterior, es claro observar que los requerimientos para la implementación de un método de cultivo con reúso mediante sistemas hidropónicos son distintos para el caso rural y para el caso urbano, pero independiente del escenario, la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento sobre aguas marinas y continentales superficiales deben cumplir con el DS 90. Por otro lado, dado que no existen grandes descargas de residuos industriales, la calidad de este efluente está fuertemente condicionado por la calidad del agua potable, la cual cumple con la norma NCh 409. Con respecto a esta, según la Tabla 37, de los 28 elementos que presentan límite máximo en la norma de riego (no se considera el molibdeno porque este hace referencia al consumo animal), 12 se satisfacen en la etapa de tratamiento para el cumplimiento de la NCh 409 (se considera la concentración admisible de SDT en la NCh 409 está dentro del rango admisible para la NCh 1.333) y solo 5 podrían necesitar un tratamiento. El resto de los 11 elementos, no aplican.

Luego, para complementar, de los mismos 28 elementos de la NCh 1.333, 11 se satisfacen en la etapa de tratamiento para el cumplimiento del DS 90 (Tabla 1: Cuerpos de aguas fluviales) y 7 podrían necesitar un tratamiento en caso de que el efluente tenga la concentración máxima tolerable por la norma, y el cuerpo receptor no sea capaz de diluir en cierta medida este aporte. El resto de los 10 contaminantes no son comparables ya que no se toman en cuenta en alguna de las dos normas, pero deberían considerarse al momento de tomar la decisión, ya que podrían afectar tanto la salud de las plantas como la de las personas o animales que las consuman, como lo es la DBO₅ que está solo en la Tabla 1 del DS 90 y no en la NCh 1.333, parámetro crítico para el reúso. Su límite máximo en esta norma es de 35 mg/lt. Dado lo anterior, para lograr reusar estas aguas es completamente necesario monitorear la calidad, y de ser necesario, tratarlas para evitar cualquier imprevisto en el sistema hidropónico. Finalmente, el cultivo se selecciona en base al efluente de la planta de tratamiento, y si es necesario, se debe acondicionar para satisfacer sus requerimientos.

Tabla 37: Límites máximos de ciertos contaminantes para el DS 90 y la norma de riego NCh 1333. El estado representa si la calidad de la tabla 1 del decreto supremo 90 es más estricta que la de la norma de riego, si no lo es, necesita tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

Contaminante	Unidad	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
		DS ⁹⁰ Tabla 1	DS ⁹⁰ Tabla 2	DS ⁹⁰ Tabla 3	DS ⁹⁰ Tabla 4	DS ⁹⁰ Tabla 5	NCh 409	NCh 1.333
Mercurio	mg/L	0,001	0,01	0,005	0,005	0,02	0,001	0,001
Cadmio	mg/L	0,01	0,3	0,02	0,02	0,5	0,01	0,01
Selenio	mg/L	0,01	0,1	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02
Cobalto	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,05
Litio (cítricos)	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,075
Arsénico	mg/L	0,5	1	0,1	0,2	0,5	0,01	0,1
Berilio	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,1
Cromo total	mg/L	-	-	2,5	2,5	10	0,05	0,1
Vanadio	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,1

Tabla 37: Límites máximos de ciertos contaminantes para el DS °90 y la norma de riego NCh 1333. El estado representa si la calidad de la tabla 1 del decreto supremo 90 es más estricta que la de la norma de riego, si no lo es, necesita tratamiento (continuación). Fuente: Elaboración propia.

Contaminante	Unidad	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
		DS°90 Tabla 1	DS°90 Tabla 2	DS°90 Tabla 3	DS°90 Tabla 4	DS°90 Tabla 5	NCh 409	NCh 1.333
Cianuro	mg/L	0,2	1	0,5	0,5	1	0,05	0,2
Cobre total	mg/L	1	3	0,1	1	3	2	0,2
Manganeso	mg/L	0,3	3	0,5	2	4	0,1	0,2
Níquel	mg/L	0,2	3	0,5	2	4	-	0,2
Plata	mg/L	-	-	-	-	-	-	0,2
Boro	mg/L	0,75	3	-	-	-	-	0,75
Fluoruro	mg/L	1,5	5	1	1,5	6	1,5	1
Zinc	mg/L	3	20	5	5	5	3	2
Litio	mg/L	-	-	-	-	-	-	2,5
Bario	mg/L	-	-	-	-	-	-	4
Aluminio	mg/L	5	10	1	1	10	-	5
Hierro disuelto	mg/L	5	10	2	10		0,3	5
Plomo	mg/L	0,05	0,5	0,2	0,2	1	0,05	5
Sodio	%	-	-	-	-	-	-	35
Cloruros	mg/L	400	2000	-	-	-	400	200
Sulfatos	mg/L	1000	2000	1000	-	-	500	250
Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100 ml	1000	1000	1000-70*	1000-70*	-	5	1000
pH	Unidad	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	6,0 - 9,0	5,5 - 9,0	6,5 - 8,5	5,5 - 9,0
SDT	mg/L	-	-	-	-	-	1500	Relativo
DBO₅	mg O ₂ /L	35	300	35	60	-	-	-

Tabla 1: Límites máximos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de agua fluviales

Tabla 2: Límites máximos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor.

Tabla 3: Límites máximos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres.

Tabla 4: Límites máximos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral.

Tabla 5: Límites máximos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral.

*Para el caso de áreas aptas para la acuicultura o áreas de manejo y explotación, no se deben superar los 70 NMP/100 ml.

Con respecto al tratamiento de agua para su futuro reuso, como se menciona en la sección 5.3 sobre alternativas de tratamiento, existen diversas tecnologías que podrían satisfacer los requerimientos de cultivo, pero en general, para el caso urbano es recomendable utilizar los tratamientos ya instalados, los cuales poseen eficiencias elevadas en relación al terreno necesario para su construcción, por ejemplo, el

tratamiento por lodos activados. Luego, dependiendo de la calidad del efluente, y solo si es necesario, se puede aplicar un tratamiento específico.

Para los sectores rurales en los cuales aún no existen PTAS, dado que los caudales son menores, es posible utilizar sistemas como humedales construidos, biofiltros, lagunas facultativas, entre otros, como también lodos activos a menor escala, pero, es necesario en algunos casos acoplarlos a un proceso de filtración rápida y/o a un proceso de desinfección para reducir la cantidad de coliformes fecales a una cantidad menor a un NMP 1000 coliformes cada 100 ml. Otra alternativa podría ser un tratamiento preliminar seguido de un reactor anaerobio de flujo ascendente, luego un humedal de flujo subsuperficial y finalmente una etapa de desinfección. En general, como se observa en la Tabla 38, la combinación de dos procesos puede generar una calidad de aguas apta para el reúso agrícola, una etapa de tratamiento biológico y otra de desinfección, luego para un reúso para cultivos que no se procesan, se recomienda aplicar un proceso de filtración. Se propone finalmente para este caso, intentar “centralizar” lo más posible el tratamiento, para aprovechar la economía de escala.

Tabla 38:Requerimientos de tratamiento del agua en función del uso (reúso) que se le quiera dar. Fuente: Conagua, 2015.

Tipos de reúso agrícola	Calidad de agua residual	Opción de tratamiento
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	pH 6,5 – 8,4	Secundario, filtración, desinfección
	DBO < 10 mg/L	
	Turbiedad < 2 UNT	
	Coliformes fecales < 14 NMP/100 ml	
	Nematodos intestinales < 1 HH/lt	
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	pH 6,5 – 8,4	Secundario, desinfección
	DBO < 30 mg/lt	
	SST < 30 mg/lt	
	Coliformes fecales < 200 NMP/100 ml	
Reúso agrícola en cultivos que no se consumen	pH 6,5 – 8,4	Secundario, desinfección
	DBO < 30 mg/lt	
	SST < 30 mg/lt	
	Coliformes fecales < 200 NMP/ 100 ml	

Los tamaños para sistemas según tipo de tratamiento y criterios de diseño se pueden calcular a partir del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos (Comisión nacional del agua, 2016) y algunas consideraciones específicas para el reúso en caso de ser necesarias se pueden obtener del mismo manual, “diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Procesos avanzados con fines de reúso” del mismo año y organismo. Luego, los volúmenes tratados deben ser almacenados según necesidad del sistema de cultivo hidropónico para poder generar un caudal recirculante constante de riego, por lo menos, durante el día.

Por otro lado, estas aguas tratadas en ocasiones no poseen estrictamente un dueño, y algunas plantas de tratamiento, realizan un ajuste de tarifa para que el recurso quede como propiedad de la planta, ya que los servicios sanitarios de producción y distribución de agua potable, y recolección y disposición de aguas residuales, no poseen una regulación explícita que lo defina (SISS, 2014). De hecho, en algunos documentos

se indica que el efluente de las PTAS es considerado un “Derrame” (SISS, 2015), el cual, según el Código de aguas, está definido según el artículo 43º como las “aguas que quedan abandonadas después de su uso, a la salida del predio”, y luego el artículo 44º indica que “los derrames que escurren en forma natural a predios vecinos podrán ser usados dentro de éstos, sin necesidad de obtener un derecho de aprovechamiento.”, se entiende que es posible utilizar el recurso de la manera que se estime conveniente, por lo que tanto las comunidades, los encargados del saneamiento y los organismos pertinentes, podrían trabajar en conjunto para instalar un sistema de reúso de aguas residuales, e ir más allá del uso para el riego de plantas ornamentales, sino más bien, utilizarla para la generación de alimentos en lugares con escasez hídrica.

Finalmente, para este trabajo se proponen dos escenarios para cada región. Para Antofagasta, se considera la APR San Pedro de Atacama ya que cuenta con un 70% de alcantarillado y tratamiento de aguas servidas, y la localidad de Lasana que cuenta solo con fosa séptica. Para la región de Coquimbo, se considera un escenario para el sector rural, en el cual se estima un caudal efluente equivalente para cada una de las 71 PTAS, y otro caso genérico para cualquiera de las 10 plantas de tratamiento con lodos activados del sector urbano. Se toma como caso particular la PTAS el Peñón, la cual cumple con la Tabla N° 1 del DS 90 (Snifa, 2019). Las características de cada caso, se presentan en la Tabla 39:

Tabla 39: Características de los cuatro casos propuestos: sector, localidad, población servida, tratamiento y caudal.
Fuente: Elaboración propia.

	Antofagasta con PTAS	PTAS Rural Coquimbo	Antofagasta sin PTAS	Genérico Coquimbo
Sector	Rural	Rural	Rural	Urbano
Localidad	San Pedro de Atacama	Alguna de las 71 PTAS	Lasana	Ej.: PTAS el Peñón.
Población servida	7.000	1.864 ₁	431	Según caudal, 3.297 ₃
Tratamiento AS	No se detalla	Lodos Activados	Fosa séptica	Lodos activados
Caudal (l/s)	17,9	0,76	0,5 ₂	9,54 ₄

¹Población total rural de Coquimbo, 132.288 (SUBDERE, 2020) dividido por las 71 PTAS registradas.

²Asumiendo una dotación de 100 lt/hab/día.

³Se calcula asumiendo una dotación de 250 l/hab/día a partir del caudal emitido.

⁴Caudal calculado considerando el 29,8% de la generación urbana (caudal equivalente al de las 10 PTAS más pequeñas) y dividido entre esas 10.

Como la localidad de Lasana no cuenta con un sistema centralizado de tratamiento, solo fosa séptica, se propone una recolección de toda esta agua servida y utilizar un sistema de tratamiento natural con un humedal construido de flujo subsuperficial para el caudal total de la localidad. Para el diseño se consideran las recomendaciones y formulas indicadas en la Tabla 35, pero finalmente los parámetros utilizados son los indicados en la Tabla 40. Es necesario destacar que debido al uso de fosa séptica se reduce la carga de sólidos en suspensión, pero aumenta la DBO₅. Para el diseño, se asume una DBO₅ inicial de 500 mg/lt, equivalente al doble del valor típico (AguasSIPRA, 2016) para aguas servidas sin un aporte industrial importante, y una DBO₅ objetivo de 30 mg/lt. Se utiliza la temperatura promedio de la zona, 11,8 °C (Climate-Data, 2020). Se recomienda luego, aplicar desinfección.

Tabla 40: Parametros de diseño para un humedal de flujo subsuperficial. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros de diseño	Valor
Caudal por tratar (m ³ /día)	43,2
Temperatura (°C)	11,8
Concentración afluente (mg/l)	500
Concentración efluente (mg/l)	30
Pendiente (m/m)	1%
Conductividad hidráulica (m/día)	165
Tasa de remoción	0,0699
Tasa de remoción ajustada por temperatura	0,03199
Tasa de remoción utilizada	0,0534
Área Transversal requerida (m ²)	26,2
Área Superficial requerida (m ²)	3.799
Dimensiones humedal subsuperficial	
Profundidad (m)	0,6
Ancho (m)	45
Largo (m)	85
Área Transversal (m ²)	27
Área superficial (m ²)	3.825

Para los tres escenarios restantes, se asume que el tratamiento realizado cumple con la norma. En caso contrario, se propone el uso de PTAS comerciales para cada caso. Nuevamente, todas deben concluir con un proceso de desinfección. Para lograr utilizar los sistemas de cultivos hidropónicos, primero es necesario comentar sobre su funcionamiento, los elementos que lo componen, su operación y criterios de diseño.

6.2 Aplicación: Cultivo sin suelo

Si bien el riego por aspersión y goteo resultan ser una buena alternativa, el cultivo sin suelo (hidroponía y fertirriego en sustrato) permite obtener la máxima eficiencia posible, sin la presencia del suelo, el cual en el caso de Antofagasta y Coquimbo generan un empeoramiento de la calidad de la solución del suelo, proporcionando además un control directo sobre los nutrientes presentes en el agua y un mínimo contacto entre el agua, y el producto final que será consumido, lo cual es coherente con la Tabla 28. Este sistema se define como: *“Sistema de regadío por el cual las raíces de los cultivos reciben una solución nutritiva equilibrada disuelta en agua con todos los elementos químicos necesarios para el desarrollo de las plantas, las cuales pueden crecer directamente sobre la solución mineral, o bien en un sustrato o medio inerte”* (Novedades Agrícolas, 2016-2020). Existen 4 tipos de sistemas hidropónicos sobre agua, cada uno en la Ilustración 17, y para este caso, se menciona también el fertirriego sobre sustrato.

- **New Growing System (NGS):** Recirculación de la solución nutritiva por multi-bandas de polietileno que poseen dos o más sectores, de manera que la solución entra al primer sector, luego cae en cascada al segundo y finalmente al tercero, si es que existe.

- **Forraje verde:** Técnica que consiste en la producción de granos de cereales o leguminosas sobre bandejas que son regadas por la técnica de nebulización.
- **Nutrient Film Technique (NFT):** Consiste en crear una película recirculante de solución nutritiva mediante un sistema de tuberías agujereadas que permiten el sostenimiento del cultivo y el contacto de la raíz con la solución.
- **Raíz flotante:** Utiliza un contenedor lleno de agua, cubierto con una tapa con orificios que permiten sostener el cultivo. Dentro del contenedor existe una solución nutritiva que está en contacto con las raíces de la planta. El sistema está en pendiente y utiliza una bomba para la recirculación.



Ilustración 17: Multi-banda 3CP para el sistema NGS, (Arriba izquierda), Forraje Verde Hidropónico (Arriba derecha); Sistema hidropónico Nutrient Film Technique en invernadero (Abajo izquierda). Sistema hidropónico de Raíz Flotante (Abajo derecha). Fuente: NGS New Growing system (2020), Groho (2020), Agriculturers (2015), PortalFrutícola (2019).

- **Cultivo sobre sustrato con fertirriego:** Esta forma de cultivo es similar al riego por goteo tradicional, pero tiene principalmente dos diferencias: la primera, es que para el riego se utiliza solución nutritiva, y la segunda, es que utiliza como medio soportante un sustrato. Permite elevadas eficiencias, un mayor control sobre el cultivo, disminuir el riesgo de plagas, entre otros.

Las principales ventajas y desventajas generales de estos sistemas, comparadas con el riego tradicional en suelo, se muestran en la Tabla 41:

Tabla 41: Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico. Fuente: Zárate, M., 2014; Beltrano, J., Gimenez, D., 2015.

Ventajas	
Libre de parásitos, bacterias y hongos externos.	Reduce costos de producción.
Independiente de fenómenos meteorológicos.	Permite cosechas contra estación.
Eficiente en espacio y costos.	Ahorro de agua, fertilizantes e insecticidas.
No utiliza maquinarias.	Limpieza e higiene en manejo de cultivo.
Mayor precocidad de cultivos.	Gran parte del proceso puede ser automatizado.
Mejor calidad del producto.	Alto rendimiento por m^2 .
Acelera el proceso de cultivo.	Permite cosechar la misma planta repetidamente durante el año.
Ampliable.	Puede ser construido en espacios reducidos y/o de forma vertical.
Desventajas	
Alto costo de inversión inicial.	Necesidad de conocimiento o capacitación para operación.
Necesidad permanente de electricidad.	Requiere personal para trasplante y cosecha.

El cultivo sin suelo es una potencial solución debido a que, gracias a su posibilidad de recircular, con pequeños volúmenes almacenados, por ejemplo, los obtenidos en los sectores rurales, es posible regar grandes cantidades de plantas. Además, permite controlar el contacto del agua con los frutos u hojas, como también monitorear la calidad. Puntos alineados con lo descrito en el capítulo 5. Por otro lado, algunos componentes del agua servida tratadas generan un impacto positivo en los cultivos, por ejemplo, el contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sulfato, por lo que, a concentraciones razonables, reducen la necesidad de fertilizantes.

Para este caso se realizará un análisis para el sistema NFT, debido a su facilidad constructiva y capacidad de ampliación. Además, a diferencia del sistema NGS, es menos costoso, con respecto al sistema de raíz flotante, utiliza menos volumen de agua, y al forraje verde, no tiene contacto directo con la zona aérea de la planta. Además, se considera el sistema de fertirriego en sustrato como medio soportante. Si bien este no tiene inicialmente la capacidad de recircular, permite plantar cultivos de mayor tamaño, como arándanos, sandía, maqui, zapallo italiano, entre otros. En ambos sistemas, se hace necesario la elaboración de una solución nutritiva, la cual proveerá los nutrientes necesarios para el cultivo que se quiera producir. Se recomienda para ambos casos instalar un estanque de regulación previo a los contenedores de riego para generar un efecto buffer.

Primeramente, es necesario entender cuáles son los nutrientes que necesitan las plantas, lo cual es en algunas ocasiones diferente a la calidad referida por la norma de riego NCh 1.333, dado que esta norma se construye a partir de una generalidad, y no según los requerimientos reales de cada cultivo en particular. Esto se fundamenta en que existen cultivos que podrían ser sensibles a ciertos elementos o compuestos, como también otros podrían ser muy tolerantes y desarrollarse de manera saludable a concentraciones por sobre el límite máximo de la norma. Por otro lado, es necesario destacar que algunos cultivos podrían sobrevivir a ciertas concentraciones de algún nutriente, pero esto no significa que su máximo rendimiento se encuentre en ese mismo rango. Este escenario podría aceptarse cuando la eliminación de ese nutriente es suficientemente más costosa que su efecto en el rendimiento.

Los nutrientes que necesitan las plantas se dividen en macronutrientes, los cuales son requeridos en mayor cantidad, y los micronutrientes, los cuales se necesitan en menor cantidad. Los nutrientes asociados a cada categoría se detallan en la Tabla 42:

Tabla 42: Micronutrientes y macronutrientes en plantas. Fuente: Beltrano, J., Gimenez, D. (2015)

Macronutrientes	Micronutrientes
Nitrógeno	Hierro
Fosforo	Molibdeno
Potasio	Boro
Calcio	Zinc
Magnesio	Níquel
Azufre	Cobre
	Manganeso

Por otro lado, las plantas también necesitan que el agua esté oxigenada, ya que a concentraciones cercanas a 3 mgO₂/L se comienza a generar hipoxia, requieren además una conductividad eléctrica generalmente entre 1.8 y 2.3 mS/cm (Beltrano, J., Gimenez, D., 2015) y un pH aproximado entre 5.5 y 7 (Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996), donde variaciones fuera de ese rango podrían generar precipitados e impedirían que la planta pueda absorber los nutrientes. Nuevamente, estas consideraciones dependen de cada planta, del ciclo de vida, y en cierta medida podrían afectar el sistema hidropónico que se quiera construir (el sustrato podría reaccionar con los nutrientes). Finalmente, la solución nutritiva es la encargada de satisfacer todas estas demandas.

Solución nutritiva

La solución nutritiva es el elemento más importante en el cultivo sin suelo ya que contiene tanto el agua que necesita la planta, como los nutrientes. Dado que el sistema NFT y el fertirriego lo utilizan como fuente principal de nutrición, su correcta elaboración es clave para obtener buenos resultados y un crecimiento optimizado.

Para realizar una buena mezcla, es necesario tener en cuenta el tipo de cultivo, la temperatura del agua, el pH, y una serie de parámetros que afectan la especiación de los nutrientes y el cómo la planta podrá captar todo lo necesario para su desarrollo. Los parámetros relevantes según la literatura y las consideraciones para su elaboración se detallan en el siguiente listado:

- Primeramente, es necesario realizar un análisis de calidad de agua para determinar pH, concentraciones de los micro y macronutrientes, para luego calcular cuánto es lo que realmente le falta a la solución. Así, la concentración por aplicar será igual a la concentración recomendada menos la concentración del agua. En caso de que la concentración del agua sea mayor para algún elemento o compuesto, es necesario evaluar el efecto de ese exceso en la planta. En algunos casos, la eficiencia de la planta podría mantenerse, pero en otros no, por lo que sería necesario realizar un tratamiento o cambiar el cultivo por uno más tolerante.

Para los casos en donde no se puede realizar un análisis de calidad de agua, se recomienda por lo menos medir pH y conductividad eléctrica. Esta última debe tener un valor entre 1,5 y 3 mS/cm.

- En general se debe mantener un pH entre 5.5 y 6.5, pero dependerá del cultivo.
 - Si se requiere disminuir el pH a un valor mínimo de 5.5, se puede agregar HNO_3 y H_3PO_4 en proporción 3:1 al 5%. Se incorpora en la solución hasta obtener el pH deseado.
 - Si se requiere aumentar el pH con un valor máximo de 7, se recomienda utilizar 10% de KOH, se disuelven en 500cc de agua y luego se completa el litro de solución. Se incorpora en la solución hasta obtener el pH deseado.
- Se recomienda cambiar la solución completa cada 3 o 4 semanas y, durante este tiempo, se debe reponer continuamente el agua perdida del estanque por el consumo de las plantas.
- Para el cultivo en sustrato, se recomienda un lavado del mismo cada 4 semanas para evitar acumulación de sales.
- Para el caso del sistema NFT con una solución nutritiva constante, se reconoce que algunas especies hortícolas que producen frutos demandan mayor cantidad de potasio que nitrógeno, por lo que se recomienda una proporción potasio-nitrógeno de 2:1. Además se recomienda agregar hierro en su forma “quelada”, donde el ion férrico está unido a un compuesto orgánico (EDTA, DTPA, EDDHA, entre otros), lo cual dificultan su precipitación y permiten que la lo absorba.
- Luego, se observa en la Ilustración 18 las concentraciones de los elementos minerales esenciales según diferentes autores. Para cumplir con tales contenidos en solución, es necesario disolver sales específicas que contienen cierto porcentaje de dichos elementos. Las sales más comunes utilizadas en hidroponía se muestran en la Tabla 43.

	Concentración (ppm)						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
N	210	168	150-225	106	172	200-236	167
P	31	41	30-45	62	41	60	31
K	234	156	300-500	156	300	300	277
Mg	34	36	40-50	48	48	50	49
Ca	160	160	150-300	93	180	170-185	183
S	64	48	--	64	158	68	--
Fe	2,5	2,8	3-6	3,8	3	12	2-4
Mn	0,5	0,54	0,5-1	0,81	1,3	2	0,62
B	0,5	0,54	0-0,4	0,46	1	0,3	0,44
Cu	0,02	0,064	0,1	0,05	0,3	0,1	0,02
Zn	0,05	0,065	0,1	0,09	0,3	0,1	0,11
Mo	0,01	0,04	0,05	0,03	0,07	0,2	--

(1) Hoagland y Aron (1938)
 (4) Jensen (s/fecha)
 (7) Steiner (1984)

(2) Hewitt (1966)
 (5) Larsen (s/fecha)

(3) FAO (1990)
 (6) Cooper (1979)

Fuente: (1), (2), (3) y (7) en Windsor and Schwarz (1990); (4) y (5) en Lorenz and Maynard (1988); (6) en Cooper (1988)

Ilustración 18: Concentración de nutrientes en solución nutritiva según varios autores. Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.

Tabla 43: Sales fertilizantes que comúnmente se utilizan en hidroponía. Fuente: Adaptado de Fuente: Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996.

Nombre químico	Formula	Solubilidad (gr/lt)
Nitrato de calcio	$Ca(NO_3)_2$	1220
Nitrato de potasio	KNO_3	130
Nitrato de magnesio	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	279
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	230
Sulfato de magnesio	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	710
Sulfato de potasio	K_2SO_4	111
Sulfato de manganeso	$MnSO_4$	980
Ácido bórico	H_3BO_3	60
Sulfato de cobre	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	310
Sulfato de zinc	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	960
Molibdato de amonio	$(NH_4)_6MoO_{24} \cdot 4H_2O$	430

- Para la preparación de la solución nutritiva se recomienda tener dos estanques de solución concentrada. El primero, debe contener la solución concentrada de nitrato de calcio junto a algún quelato de hierro (si es necesario), mientras que el otro, según la necesidad del cultivo, debe contener el resto de los fertilizantes. Esta es una práctica que se realiza para evitar el precipitado de elementos que se forman al combinar ambas soluciones, y para poder corregir de manera más fácil la relación entre el nitrógeno y el potasio, en caso de ser necesario.

Construcción y consideraciones con respecto al sistema NFT

El sistema NFT requiere un estanque colector, canales de cultivo, una bomba, red de distribución y una tubería colectora (Carrasco, G., Izquierdo, J., 1996). Por otro lado, cada uno de estos elementos tiene ciertos requerimientos y consideraciones, las cuales se detallan a continuación:

- **Estaque colector:** Su función es almacenar la solución nutritiva que requiere el cultivo, y su tamaño depende del tipo de cultivo y de la densidad de plantación. A modo de ejemplo, una lechuga consume 0,3 litros de agua al día en su máximo estado de desarrollo, si se planta a una densidad de 24 plantas por metro cuadrado, se debería utilizar un estanque de 7.2 litros por metro cuadrado⁴. Este valor en sistemas pequeños se acostumbra a duplicar, y para sistemas de mayor capacidad, se multiplica por 1,25 para asegurar un margen del 25%.

El estanque no debe reaccionar con la solución nutritiva y debe estar aislado lumínicamente para que no se fomente la presencia de algas que consuman el oxígeno dentro del mismo.

- **Canales de cultivo:** Es el medio por el cual se transporta el agua y se sostienen las plantas. Se recomienda que sea no transparente y de sección rectangular lisa para asegurar un flujo homogéneo, idealmente, se espera alcanzar una capa de agua de espesor cercano a 4 o 5 mm. Esta sección posee agujeros en la zona superior, los

⁴ Un tomate consume 2.5 litros al día y con una densidad de plantación de 5 tomates por metro cuadrado, requieren 12.5 litros por metro cuadrado, el estanque sería de 16 litros por metro cuadrado considerando un factor de 1.25. Un pepino consume 3 litros al día y se cultiva con una densidad de 5 plantas por metro cuadrado. La capacidad sería de 19 litros por metro cuadrado considerando el factor de 1.25.

cuales tienen insertados sujetadores para la planta (puede ser un cubo de espuma) y se instala en pendiente (2%) para asegurar el flujo. Una pendiente mayor influye en la capacidad de absorción de nutrientes de la planta, y una menor, en el flujo de la solución. De la misma manera, debe existir una pendiente entre canales de cultivo para que exista pendiente en la tubería colectora (puede ser 2%).

Finalmente, se recomiendan longitud máxima de 15 metros para asegurar presencia de oxígeno en el último tramo.

- **Bomba:** Su elección depende de las condiciones hidráulicas del sistema, como el caudal y la altura de elevación, la cual sería la diferencia entre la cota de agua dentro del estanque y la entrada al canal de cultivo (es necesario considerar pérdidas de carga). También depende de su calidad física, ya que deberá funcionar permanentemente y estará en contacto con la solución nutritiva, la cual puede afectar su vida útil. En general, en cada canal de cultivo se requieren entre 2 a 3 litros por minuto y se considera un margen del 20%. Esto finalmente depende del tamaño de la sección del canal de cultivo.
- **Red de distribución:** Participan en la conexión entre el estanque y los canales de cultivo, generalmente son de PVC o goma, dependiendo del tamaño del sistema. Para grandes cantidades de producción se recomienda PVC de 1 pulgada, dada su mayor vida útil, y para pequeños o medianos sistemas, mangueras de riego de 1 a 2 cm.
- **Tubería colectora:** Recoge toda la solución nutritiva que sale de las canales de cultivo, y la lleva nuevamente al estanque.

Esta tubería se ubica un poco más abajo del nivel de salida de la solución desde las canales, para que exista una pequeña caída que permita la oxigenación. Puede ser abierta o cerrada dependiendo de la temperatura y el tamaño del sistema, abierta para temperaturas moderadas y sistemas relativamente pequeños o medianos, y cerradas para sistemas más complejos y presencia de una oscilación térmica importante. La idea es que la caída de agua hacia el estanque también genere oxigenación, por lo que se recomienda una caída de al menos 50 centímetros entre la salida de la tubería colectora (entrada de agua al estanque), hasta el nivel de agua en el estanque.

Con todas estas consideraciones, podría ser relevante destacar que, dado que las temperaturas en las regiones de Coquimbo y Antofagasta poseen una fuerte oscilación entre el día y la noche, idealmente estos sistemas se deberían construir en invernaderos térmicamente acondicionados, para que no se dependa del clima de la zona y lograr mantener una temperatura entre 4,5 y 27 °C, rango óptimo para el crecimiento de lechuga. Además, deberán ser construidos cerca de la planta de tratamiento de aguas servidas, para minimizar el costo de conducción del agua de reúso.

Para una correcta construcción de un sistema NFT y lograr cosechar sin problemas las líneas centrales, estos sistemas deben tener como máximo 8 – 10 canales de cultivo. Por otro lado, debido a que se recomienda un largo máximo de 15 metros, estos sistemas se construyen de forma modular, cada uno de estos, con un máximo de 10 canales de cultivo y 15 metros de largo cada uno.

Los criterios de diseño para este caso, se observan en la Tabla 44, con 10 canales de 12 metros de largo, con una capacidad de 360 lechugas en total.

Tabla 44: Elementos y parámetros de diseño para un sistema de cultivo hidropónico. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro/Elemento	Valor
Sistema de cultivo	
Largo canal	12 m
Pendiente	2 %
Número de canales	10 unidades
Diámetro canal de cultivo	110 mm
Distanciamiento entre canales	19 cm
Agujero canal de cultivo	1,75 pulgadas \approx 45 mm
Distanciamiento entre agujeros	33 cm
Ancho Total	1,82 m
Largo Total	12 m
Altura (Máxima – Mínima)	1,5 – 1,14 m
SopORTE	
Diámetro tubería PVC	32 mm

Luego, para implementar el sistema NFT en los casos determinados anteriormente, en primer lugar, se estima el consumo de lechugas por parte de los habitantes a partir de la producción anual, 300 millones de lechugas (Tapia, B., 2002), y la población chilena para el mismo año, 15,12 millones (INE, 2002). El consumo por persona estimado es de 19,84 lechugas al año, es decir 1,65 mensuales. Se aproxima a 2 mensuales. Esto es válido solo porque la exportación fue del 0,1%. A partir de esto, se calcula la demanda total de los sectores. Los valores se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45: Requerimientos de lechuga por sector, y cantidad de sistemas NFT necesarios para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.

	San Pedro de Atacama	PTAS rural en Coquimbo	Lasana	PTAS el Peñón
Habitantes	7.000	1.864	431	3.297
Consumo total de lechugas	14.000	3.728	862	6.594
Capacidad módulo NFT	360	360	360	360
Numero de módulos	41	11	2,5	19
Producción de lechugas en diseño	14.760	3.960	900	6.840
Exceso/falta	760	232	38	246
Porcentaje Exceso c/r al consumo	5%	6%	4%	4%

A partir de la producción de lechugas en diseño por parte de los sectores, se calcula el caudal necesario para regarlas mediante el sistema de cultivo NFT y el volumen del estanque utilizado. Se considera un factor de seguridad para el requerimiento diario de la lechuga (0,3 lt/día) del 25%, y para el volumen del estanque utilizado, se considera aproximadamente el doble del requerido. Los valores se observan en la Tabla 46.

Tabla 46: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos NFT en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Caudal disponible (lt/s)	Caudal necesario ¹ (l/s)	Volumen estanque requerido ² (m ³)	Volumen estanque utilizado ³ (m ³)
San Pedro de Atacama	17,9	0,0641	5,6	10
PTAS rural en Coquimbo	0,76	0,0172	1,5	3
Lasana	0,5	0,0039	0,4	1
PTAS El Peñón	9,54	0,0297	2,6	5

¹Se calcula a partir de los 0,3 litros al día que consume una lechuga, y la producción simultánea de esta. Considera un factor de seguridad del 25%.

²Es el volumen requerido diario. Se calcula a partir del caudal necesario.

³Debido a que el estanque debe tener la capacidad de saturar el sistema, satisfacer las demandas del cultivo y no vaciarse, se considera un volumen de aproximadamente el doble para cada caso.

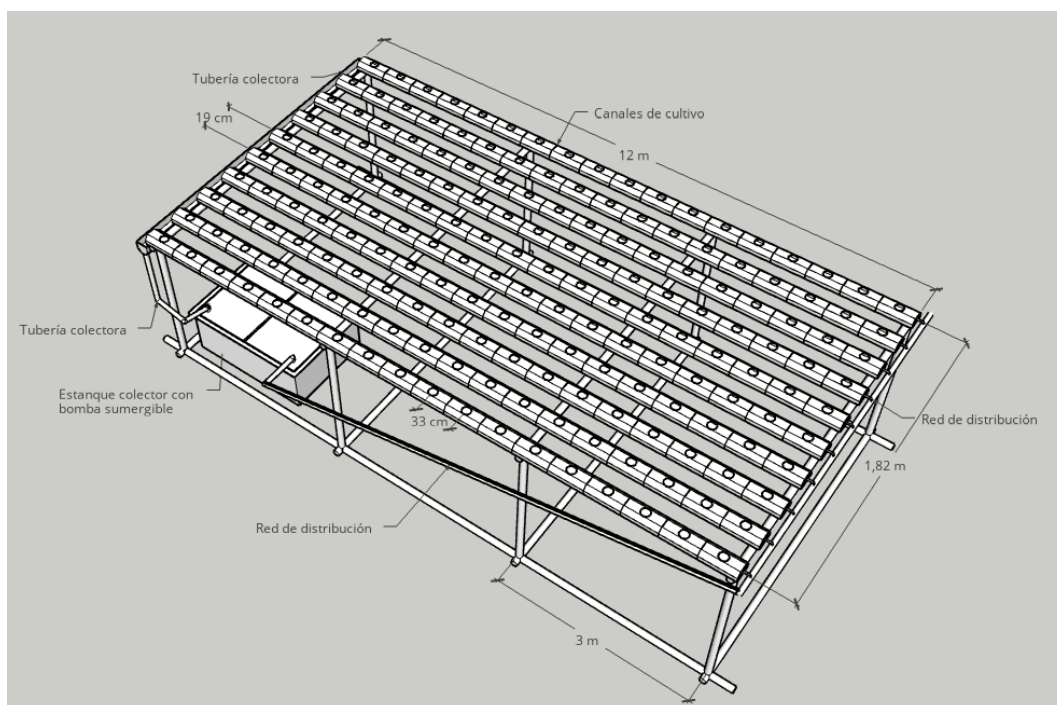
Los materiales y costos necesarios para construir este sistema NFT, según esquema en Ilustración 19, se observan en Anexo 8, 9, 10 y 11. Es necesario destacar, que, para el caso de San Pedro de Atacama, una de las 71 PTAS en Coquimbo y en el sector PTAS El Peñón, se agrega opcionalmente una planta de tratamiento que incluye un tablero eléctrico, motor soplador, decantador primario, reactor biológico, clarificador, cloradora y decoloradora. Por sí sola, cumple con la Tabla 1 del DS^o 90 y con la NCh 1.333. Se consideró un espacio entre sistemas de 2 metros, con respecto a ambos ejes.

Los costos de inversión para cada escenario, se muestran en la Tabla 47. No incluye sales fertilizantes.

Tabla 47: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Costos Sin PTAS	Costos Con PTAS/humedal
San Pedro de Atacama	\$98.432.457	\$106.221.634
Alguna de las 71 PTAS	\$18.366.948	\$21.493.630
Lasana	\$3.885.315	\$14.681.865 ¹
PTAS El Peñón	\$34.163.244	\$37.289.926

¹Considera humedal. Según Tabla 30, el humedal tiene un costo de inversión por persona de 20 – 30 \$US. Considerando el valor del dólar del 6 de mayo del 2020 (835 pesos) y los 431 habitantes de Lasana, la inversión sería de \$10.796.550. El valor del humedal es para tratar los 0,5 litros por segundo. El costo de las PTAS de los otros sectores, es solo por el caudal necesario para el cultivo.



Nota: El NFT cotizado posee 5 apoyos en la vertical (uno cada 3 metros), en vez de 4 como muestra la figura.

Ilustración 19: Esquema referencial de sistema NFT. Fuente: Elaboración propia.

Construcción y consideraciones con respecto al fertirriego en sustratos.

Los elementos que componen este sistema son: un estanque colector, una bomba, una red principal, secundaria y terciaria, ramales de riego, goteros, contenedores y el sustrato. Es necesario mencionar que este sistema no pretende ser recirculante, pero podría serlo.

- **Estanque colector:** Debe cumplir con las mismas características de material que en el sistema NFT, pero es diferente en su capacidad. Este, dado que no es parte de un sistema recirculante, debe tener una capacidad de almacenamiento según cálculos convencionales de riego por goteo. Esto puede ser calculado mediante el método de Penman-Monteith, el cual determina cual es la evapotranspiración de referencia, y luego, al multiplicar por el coeficiente de cultivo, se obtienen los requerimientos hídricos según tipo de planta (Savva, A., Frenken, K., 2002), o como alternativa, y de todas maneras recomendable para este sistema, mediante una calibración de prueba y error entre el tiempo de riego y la cantidad de drenaje obtenida luego de este. Esto permite regar considerando la capacidad de retención real del sustrato y regar con lo necesario.
- **Bomba:** Debe satisfacer las demandas de caudal, presión de funcionamiento de los goteros, y altura de elevación, considerando pérdidas de carga del sistema. Para este caso se consideran las pérdidas por el uso de goteros, las cuales las define el proveedor del mismo. Debe cumplir también con la resistencia a la corrosión y durabilidad para poder trabajar con la solución nutritiva.

- **Redes de tuberías:** Existen tres categorías de tuberías para este sistema de riego:
 - Principal: Consiste en la tubería que lleva la solución nutritiva hasta donde comienza una red de riego de un sector. Generalmente es de PVC.
 - Secundaria: Dado que pueden existir múltiples sectores, las secundarias cumplen la función de distribuir el caudal en esos sectores. Generalmente son de PVC.
 - Terciarias: Distribuyen la solución nutritiva hacia los sub-sectores definidos por el regante. Generalmente son de PVC o polietileno.
 - Ramales de riego: Surgen desde las tuberías terciarias y contienen a los goteros, generalmente son de polietileno dada su flexibilidad.
- **Goteros:** Es un componente elemental del sistema ya que permite que el riego se complete de forma eficiente. Existen goteros autocompensantes (permiten alcanzar un caudal constante), antidrenantes (se cierran frente a caídas de presión) y regulables (permiten regularlos remotamente), la elección de los goteros es muy importante al momento del diseño y más aún en terrenos con una pendiente considerable⁵.

Con respecto los tiempos de riego específicos se pueden calcular a partir de la división entre el volumen de riego necesario y los caudales de los goteros según el fabricante. Se recomiendan tiempos que van entre 2 a 4 minutos para riego intermitente. Luego, el volumen de riego depende de factores como la capacidad de retención de agua del sustrato, requerimiento de la planta, entre otros. En general, es posible determinarlo a partir del método de prueba y error mencionado anteriormente, que depende de la pérdida de agua por drenaje de la unidad de sustrato (sistema contenedor-sustrato-planta). Para su cálculo, se considera un tiempo determinado, que podrían ser los mismos 2 a 4 minutos ya señalados, con un caudal que permita generar un drenaje en la unidad de sustrato de aproximadamente un 10% del volumen regado, o mayor en caso de ser necesario⁶. Si no se genera el drenaje requerido luego de los 2 a 4 minutos, se calibra variando el caudal o el tiempo de riego. Esto se repite dependiendo el tipo de planta. Técnicamente se recomienda utilizar un tensiómetro para determinar la humedad del sustrato.

El comienzo y termino del ciclo diario de riego, se recomiendan en la Tabla 48 los horarios que aplican dependiendo de las condiciones ambientales, el tipo de cultivo, y si se está frente a un crecimiento vegetativo, o reproductivo. Para el crecimiento vegetativo, se recomienda comenzar temprano y finalizar tarde; para el crecimiento reproductivo se recomienda comenzar tarde y terminar temprano.

⁵ Los goteros autocompensantes ayudan a controlar las diferencias de energía que se presentan cuando existe pendiente en el terreno. Esto ayuda a que el caudal se mantenga constante a lo largo de toda la línea y entre líneas.

⁶ Es necesario cuando se tiene una conductividad eléctrica por sobre el requerimiento del cultivo. Esto ayuda a evitar la acumulación de sales en el sustrato.

Tabla 48: Regla general para el riego con respecto al amanecer y al atardecer.

	Inicio c/r amanecer	Fin c/r atardecer
Riego temprano	0 – 1 horas después	3 – 6 horas antes
Riego normal	1 – 2 horas después	1 – 3 horas antes
Riego tardío	2 – 4 horas después	0 – 1 horas antes

- **Contenedor de cultivo:** Deben ser opacos, permitir la contención del sustrato y la planta, su tamaño dependerá del tamaño del cultivo. En el fondo del contenedor se deben hacer agujeros que permitan el drenaje del exceso de solución.
- **Sustrato:** El sustrato es también un elemento muy importante. Existen diversos tipos de sustratos, algunos inertes, otros activos, orgánicos, inorgánicos. Los sustratos inertes más utilizados son la perlita, arena y lana de roca, y los activos más utilizados son la turba, fibra de coco y vermiculita. Esto, debido a que cumplen con gran parte de las características descritas en los siguientes puntos (Beltrano, J., Gimenez, D., 2015).
 - Porosidad óptima de un 80% y una capacidad de proporcionar un índice de vacío por aire entre un 20 y 30% del volumen total, luego de permitir el drenaje. Esto permite la presencia de oxígeno, una elevada capacidad de retención de agua y un buen drenaje. Para lograr lo anterior, se requiere un tamaño de partícula entre 0,25 y 2,5 micrómetros.
 - Una capilaridad que permita un movimiento del agua en todas las direcciones. Esta característica permite que toda la zona radicular tenga contacto con el agua y se forme un bulbo húmedo.
 - Estabilidad física que permita que su densidad y propiedades se mantengan constante. Que no se produzca compactación ni descomposición del material, y que sea uniforme con respecto al tamaño de partícula.
 - Capacidad de intercambio catiónico. Esto permite retener e intercambiar nutrientes con la planta.
 - Para el caso de los sustratos inertes, este efecto pierde relevancia. Generalmente es usado con riego continuo.
 - Para el caso de sustratos activos, se recomienda una capacidad de intercambio catiónico superior a 20 meq cada 100g. Se utiliza considerando un riego intermitente. Es recomendable lavar estos sustratos cada cuatro semanas (Zárate, M., 2015).
 - Capacidad de tampón para regular pH, baja salinidad y baja velocidad de descomposición.
 - Se recomienda una baja densidad aparente del sustrato para un fácil manejo y para eficiencia de material de soporte.
 - Se requiere que el sustrato se pueda obtener de manera rápida y fácil, como también que el costo permita la elaboración del proyecto.
 - En cualquier caso, el sustrato debe permitir que se mantenga un contenido de humedad entre un 50 y 80%, con 55-65% en invierno y 60-75% en verano, y un pH de la solución del suelo entre 5.5 y 7.

- En algunos casos, es posible instalar una canaleta de retorno para reutilizar los excesos de solución nutritiva.

Para la construcción de este sistema, según se observa en la Ilustración 20 y 21, consiste en 2 sectores, los cuales a la vez se dividen en 3 sub-sectores cada uno. Los sub-sectores poseen la capacidad de regar por goteo a 176 plantas de tomate (un gotero por planta). El cálculo hidráulico se observa en el Anexo 16. Se utiliza para la matriz una tubería de 50 mm, luego para la separación en sectores una de 32 mm para terminar con mangueras de 20 mm. Además, se consideran válvulas en la entrada de cada sub-sector.

Para la correcta construcción del sistema de fertirriego, es necesario obtener la demanda de tomates promedio mensual por persona, a partir de la producción anual, 349.000 toneladas para el año 2013 (ODEPA, 2014), y la población chilena para el mismo año, 17,57 millones. El consumo por persona estimado es de 19,86 kg de tomates al año, es decir 1,65 mensuales. Asumiendo que cada tomate pesa 200 gr, se estima un consumo de 8.3 tomates mensuales. Luego, una planta genera aproximadamente 25 cultivos cada 3 – 4 meses, por lo que se asume que, con una planta, se satisface la demanda de 3 personas por cada ciclo. A partir de esto, se calcula la demanda total de los sectores. Los valores se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49: Requerimientos de tomates por sector, y cantidad de sistemas de fertirriego requeridos para satisfacer la demanda. Fuente: Elaboración propia.

	San Pedro de Atacama	Una PTAS en Coquimbo	Lasana	PTAS el Peñón
Habitantes	7.000	1.864	431	3.297
Plantas de tomate necesarias para satisfacer la demanda cada 4 meses	2.334	622	144	1.099
Capacidad módulo Fertirriego	1.056	1.056	1.056	1.056
Plantas necesarias para satisfacer demanda todos los meses	9.336	2.488	576	4396
Numero de módulos	9	3	1	5
Producción de plantas de tomate	9.504	3.168	1.056	5.280
Exceso/falta	167	680	480	884
Porcentaje Exceso c/r al consumo	2%	27%	83% ¹	20%

¹Se considera el sistema de 1.056 ya que es posible cultivar en 4 sectores y cultivar solo en 704. Con exceso de 22,2%.

A partir de la cantidad de tomates demandados por parte de los casos, se calcula el caudal necesario para regarlos mediante el sistema de fertirriego y también el volumen del estanque utilizado. Se considera un factor de seguridad en el requerimiento diario del tomate (2,5 lt/día) del 25%, y para el volumen del estanque utilizado, se considera nuevamente un factor de seguridad del 25% para cumplir con no vaciarse y almacenar un excedente por cualquier eventualidad. Además, se ajusta según estanques comerciales. Los valores se observan en la Tabla 50.

Tabla 50: Caudales y volúmenes característicos necesarios para implementar los sistemas de cultivos mediante fertirriego en los cuatro casos. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Caudal disponible (lt/s)	Caudal necesario ¹ (l/s)	Volumen estanque requerido ² (m ³)	Volumen estanque utilizado ³ (m ³)
San Pedro de Atacama	17,9	0,382	33	45
PTAS rural Coquimbo	0,76	0,115	9,9	15
Lasana	0,5	0,038	3,3	5
PTAS El Peñón	9,54	0,191	16,5	25

¹Se calcula a partir de los 2,5 litros al día que consume una planta de tomate y la producción simultanea de este. Considera un factor de seguridad del 25%.

²Es el volumen requerido diario. Se calcula a partir del caudal necesario.

³Debido a que el estanque debe satisfacer las demandas del cultivo, no vaciarse y almacenar un excedente por cualquier eventualidad, se considera otro factor de seguridad del 25%. Luego, se ajusta según estanques comerciales.

Los materiales y costos necesarios para construir el sistema de fertirriego, según esquema en Ilustración 20 y 21, se observan en Anexo 12, 13, 14 y 15. Es necesario destacar, que, para el caso de San Pedro de Atacama, una de las 71 PTAS en Coquimbo y en el sector PTAS El Peñón, se agrega opcionalmente una planta de tratamiento que incluye un tablero eléctrico, motor soplador, decantador primario, reactor biológico, clarificador, cloradora y decloradora. Por si sola, cumple con la Tabla 1 del DS 90 y con la NCh 1.333.

Los costos de inversión para cada escenario, se muestran en la Tabla 51. No incluye sales fertilizantes.

Tabla 51: Costos de sistemas NFT con y sin PTAS, para los 4 casos. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Costos sin PTAS	Costos con PTAS
San Pedro de Atacama	\$68.949.949	\$92.317.480
PTAS rural en Coquimbo	\$23.060.879	\$30.850.056
Lasana	\$7.256.003	\$18.052.553
PTAS El Peñón	\$38.326.421	\$53.904.775

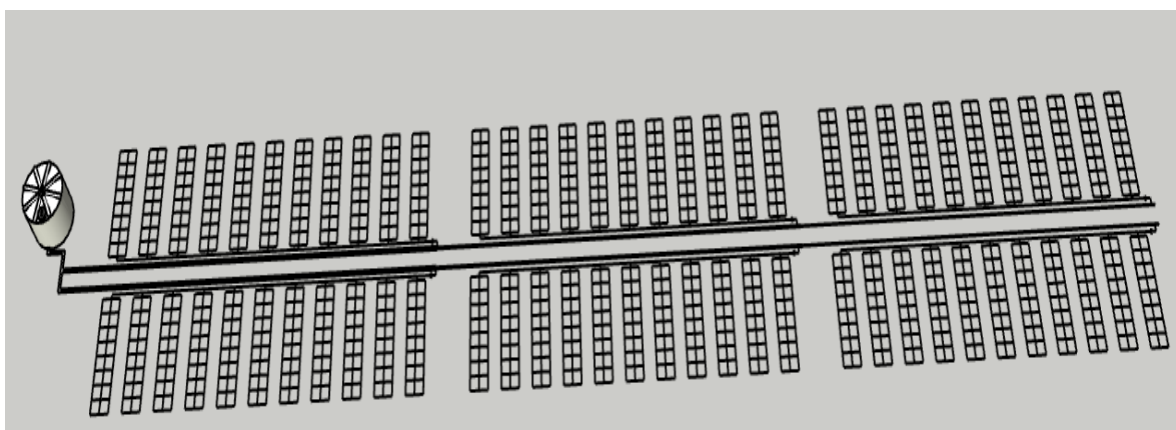


Ilustración 20: Esquema del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 6 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.

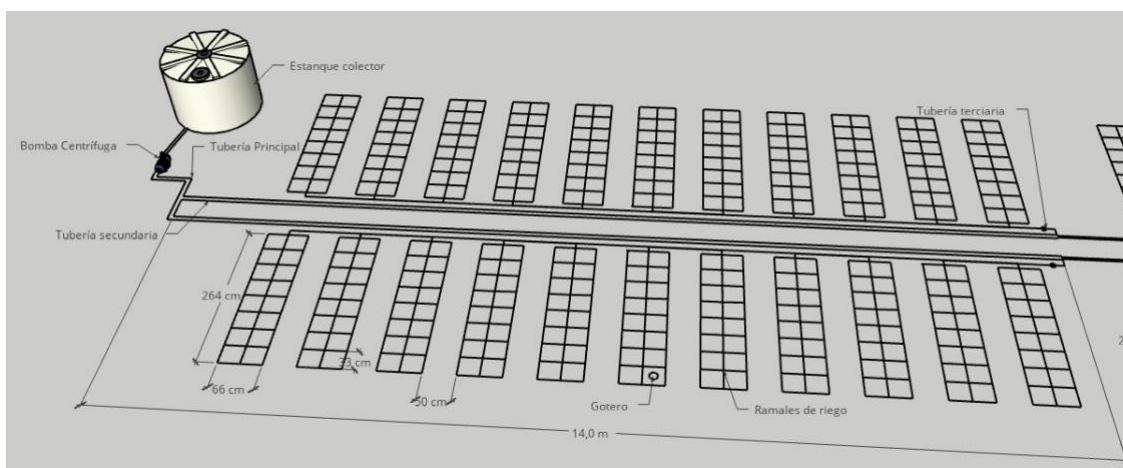


Ilustración 21: Esquema de la primera sección del sistema de fertirriego en sustrato. Considera 2 sectores con 11 mangueras cada uno. Cada manguera posee 16 goteros que riegan tomates mediante un microtubo y una estaca. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los costos y caudales necesarios para satisfacer la demanda de lechuga y tomate en conjunto, son los indicados en la Tabla 52.

Tabla 52: Costos y caudales totales para sistemas NFT y fertirriego para las cuatro localidades. Se incluye porcentaje utilizado con respecto a la oferta de aguas servidas tratadas. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Costos Sin PTAS NFT	Costos con PTAS Fertirriego	Costos totales	Caudal utilizado (l/s) – (%)
San Pedro de Atacama	\$98.432.457	\$68.949.949	\$167.382.406	0,408 – (2%)
PTAS rural en Coquimbo	\$18.366.948	\$23.060.879	\$41.427.827	0,132 – (17%)
Lasana	\$3.885.315	\$7.256.003	\$11.141.318	0,042 – (8%)
PTAS El Peñón	\$34.163.244	\$38.326.421	\$72.489.665	0,221 – (2%)

Luego, la producción de lechuga y tomate por metro cuadrado, se calcula a partir de la producción total de ambos cultivos, dividido por el área utilizada. Se considera como área la utilizada por el invernadero. Los valores se observan en la Tabla 53.

Tabla 53 Producción total de diseño de lechuga y de tomate. Rendimiento por metro cuadrado cultivado sin planta de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

Caso	Producción Lechuga	Producción tomate ¹	Área utilizada para cultivo de lechuga ² (m ²)	Área utilizada para cultivo de planta de tomate (m ²)	Rendimiento (Lechuga/m ²)	Rendimiento (tomate/m ²)
San Pedro de Atacama	14.760	59.400	2.400	3.600	6,15	16,5
PTAS rural en Coquimbo	3.960	19.800	800	1.200	4,95	16,5
Lasana	900	6.600	200	400	4,5	16,5
PTAS El Peñón	6.840	33.000	1.200	2.000	5,7	16,5

¹Se calcula a partir de la producción de diseño de plantas de tomate, multiplicado por el rendimiento de esta (25 tomates por planta). Luego, se divide por 4 ya que solo ¼ del total cultivado está listo para consumir.

²Se calcula a partir de los invernaderos utilizados para el cultivo.

7 Conclusiones y recomendaciones

Debido a la escasez hídrica, en particular en algunas regiones de Chile, gran parte de los esfuerzos se han destinado al mejoramiento de las técnicas relacionadas al uso del agua, y a lo que respecta a su manejo en los diferentes sectores económicos. En particular, la industria agropecuaria es una de las más importantes a nivel nacional y la que consume la mayor parte del recurso hídrico. En las regiones de Antofagasta y Coquimbo, si bien no poseen la mayor concentración de hectáreas destinadas al sector agrícola del país, 1.814 ha y 146.000 ha correspondientemente, con tendencia al cultivo de plantas forrajeras, hortalizas y frutales, este mismo sector utiliza respectivamente un 17% y un 83% del recurso hídrico regional. Además, ambas regiones poseen limitaciones importantes con respecto a la cantidad y calidad de las aguas en sus cuencas, por lo que la preocupación con respecto al futuro de ambas regiones aumenta frente a la incertidumbre generada por el cambio climático, la disminución de las precipitaciones (entre 20 y 30%), el aumento de la población, y el vaciamiento de los embalses.

El censo silvoagropecuario del 2007 registra que la gran mayoría de los sistemas de riego para Antofagasta son por tendido (93%), y para Coquimbo por cinta/goteo (46%), seguido de tendido (26%) y surco (24%), observándose primeramente una necesidad de realizar un nuevo censo, y de tecnificar el riego en la región de Antofagasta. Por otro lado, los sistemas de conducción, como canales y tuberías, poseen importantes filtraciones debido a la falta de mantenimiento, y el recurso hídrico es cada vez más difícil de obtener.

En ambas regiones existen zonas en la cual se encuentran concentraciones elevadas o moderadamente elevadas de boro, sulfato, cloruro, arsénico, y por implicancia, SDT, lo que hace necesario el uso de sistemas de tratamiento, los cuales, si bien permiten el mejoramiento de la calidad, y en el caso de la desalinización generar una nueva fuente, son muy costosos debido a la gran cantidad de agua que requiere el sector. Para remover los contaminantes críticos, se utiliza generalmente osmosis inversa (alcanza valores aproximados de 3 dólares por metro cubico tratado en la planta), intercambio iónico, o humedales construidos, pero también es posible utilizar procesos de coagulación, oxidación, sedimentación, entre otros para facilitar la remoción, por ejemplo, de arsénico. Dado que algunos de los elementos anteriores aportan a la salinidad, y esta afecta al cómo la planta obtiene sus nutrientes y el agua, es importante considerarla. En particular, el contacto del agua con el suelo genera una solución del suelo, la cual en Antofagasta y en algunas zonas de Coquimbo es generalmente de mala calidad, dificultado la obtención de un rendimiento óptimo de las plantas aun cuando la calidad de las aguas tratadas podría ser excelente. Esto obliga a utilizar cultivos tolerantes a las condiciones adversas de salinidad y boro, como el esparrago, e invertir una gran cantidad de dinero para asegurar el desarrollo del cultivo mediante procesos de lixiviación o aplicando iones de calcio para mejorar la estructura del suelo.

Comprendiendo la situación de déficit en cantidad y calidad, y los deterioros de los suelos para ambas regiones, considerando además que en Chile se tratan 3,52 millones de metros cúbicos al día, se propone el reúso de aguas servidas en sistemas de cultivo hidropónicos. Para esto, Chile posee un primer paso que es la ley 21.075 que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises, además de un tratamiento de agua potable en Antofagasta y Coquimbo que remueve una gran parte de los elementos críticos. Por otro lado, el sector urbano posee un elevado porcentaje de cobertura de

alcantarillado, en zonas urbanas ya existen sistemas de tratamiento de aguas servidas que cumplen con las normas de emisión (DS N°90), en algunos casos solo primario, pero en otros, también secundario. Finalmente, en zonas rurales la ley 20.998, Regulación Servicios Sanitarios Rurales, podrá ser una oportunidad para generar un impulso en el ámbito sanitario, aumentando la accesibilidad a la red de alcantarillado, que hoy en día es del 19%, permitiendo también regular las problemáticas con las PTAS ya instaladas, y construir nuevas plantas de tratamiento que podrían dar el pie para reusar las aguas servidas tratadas en pequeños sistemas de cultivo hidropónicos.

La ley N° 18.450, ley de riego, permite generar recursos para proyectos que permitan mejorar la calidad y eficiencia de la aplicación de agua de riego, por lo que podría ser aplicable para obtener recursos para la construcción de estos sistemas integrales, donde se tienen ofertas de aguas servidas tratadas del orden de los cientos de litros por segundo para los sistemas urbanos en ambas regiones, con 970 lt/s en Antofagasta, y 1100 l/s en Coquimbo, ambas incluyendo emisarios submarinos. Para el caso rural, se tienen ofertas de aguas servidas tratadas del orden de decenas de litros por segundo, entre 18 y 24 lt/s en Antofagasta y 54 lt/s en Coquimbo. Es necesario comentar que esta propuesta aporta una fuente de agua y permite generar nuevos recursos, de hecho, entre las 3 vías (urbano, rural y emisarios submarinos) se aporta a un 67,8% de la demanda agrícola de Antofagasta y un 7,6% de la demanda agrícola de Coquimbo, pero en ningún caso termina con la escasez hídrica.

Por otro lado, en Chile ya existe la discusión de la NCh 3452 sobre “Reúso de aguas residuales tratadas para riego - Directrices para la adaptación de sistemas y prácticas de riego a aguas residuales tratadas”, la NCh 3456 sobre “Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego - Parte 1: Base de un proyecto de reúso para riego”, la NCh 3482 sobre “Directrices para la evaluación y gestión de riesgos para la salud en el reúso de agua regenerada”, y finalmente la NCh 3483 sobre “Directrices para la clasificación del grado de calidad del agua para el reúso de agua”.

Para lograr utilizar el agua servida tratada, desde que el agua entra a la planta y llega al sistema de cultivo hidropónico debe pasar al menos por un proceso de filtración, un tratamiento secundario y un proceso de desinfección para asegurar la inocuidad. Además, es necesario que la parte comestible del cultivo no tenga contacto con el agua de riego, y que no existan un valor mayor a NMP 1000 coliformes fecales cada 100 ml, ni presencia de nematodos intestinales. Considerando que existen varias alternativas para cumplir con estos requerimientos, en esta memoria se propone principalmente la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial. El diseño en este caso contempla la reducción de la DBO₅ desde 500 mg/lit hasta 30 mg/lit, con un área superficial de 3.825 m² (45 ancho, 85 largo) y un área transversal de 27 m², lo cual se cumple con una profundidad de 0,6 m. Otra alternativa, es el uso de un pre-tratamiento, lodos activados y desinfección. Para este caso se consultan valores y capacidades comerciales. Finalmente, luego del tratamiento es necesario almacenar el volumen tratado para generar un caudal constante de riego.

Es necesario destacar que, dado que la calidad de las aguas residuales está fuertemente condicionada por la calidad del agua potable, 12 de los 28 elementos normados por la NCh 1.333 se tratan en el proceso de potabilización, 5 necesitarían tratamiento y 11 elementos no son comparables.

El uso de aguas servidas tratadas en sistema de cultivos hidropónicos permite obtener una máxima eficiencia posible del recurso hídrico, sin la presencia de suelo, lo cual en ambas regiones genera un aporte negativo con respecto a la calidad, y proporciona un control directo de los nutrientes presentes en el agua, como también un mínimo contacto entre el agua y el cultivo. Por otro lado, debido a que el tratamiento secundario generalmente remueve un elevado porcentaje de DBO₅, sólidos en suspensión, entre otros, estos no remueven en su totalidad nutrientes como el nitrato o el fosfato, los cuales que aportan a la nutrición de las plantas, disminuyendo la necesidad del uso de sales fertilizantes.

Para la construcción de los sistemas hidropónicos propuestos se consideraron las localidades de San Pedro de Atacama y Lasana en Antofagasta y una PTAS rural y la PTAS El Peñón en Coquimbo. Se diseñó un conjunto de sistemas NFT y fertirriego para satisfacer la demanda de lechuga y tomate en las localidades. Finalmente se obtiene que con 167,4; 41,5; 11,2; 72,5 millones de pesos respectivamente, y un consumo del 2%, 17%, 8% y 2% con respecto al total ofertado de aguas servidas tratadas, se logra abastecer a las localidades con lechuga y tomate. Se logran eficiencias promedio para lechuga de 5,33 por metro cuadrado, y para tomates, de 16,5 por metro cuadrado.

Finalmente, es necesario destacar que los métodos para lograr el reúso aún son cuestionados debido a la poca experiencia y la necesidad de que todas las partes involucradas (desde la PTAS hasta el consumidor) cumplan con los requerimientos, y que, en Chile, si bien hoy en día se discuten normas para regular el reúso de aguas servidas tratadas, no existe aún norma o ley que permita utilizar estas aguas servidas tratadas directamente en el riego de cultivos comestibles. Luego, las recomendaciones destacadas en esta memoria pretenden entregar una opción para una aplicación futura segura, disminuyendo el contacto con el agua al máximo, y generando el más elevado rendimiento.

El desafío siguiente sería entonces, concientizar a las personas y a los agricultores de que esta agua con su correcto tratamiento es inocua, y permite obtener los mismos o mejores resultados que un recurso de otra fuente, como también generar o modificar las leyes para que lo regule y permita.

Para lograr un correcto tratamiento, es necesario realizar capacitaciones para el personal encargado de operación del proceso de tratamiento y mantenimiento considerando el reúso, para el caso rural un comité APR organizado, una cercanía entre la PTAS y el sistema de cultivo hidropónico, aprovechamiento de infraestructura existente, y el uso/dimensionamiento correcto de los sistemas de tratamiento.

8 Bibliografía

Agriculturers (2015). Aprende sobre el sistema hidroponía NFT. Recuperado el 1 de mayo, 2020, de: <https://agriculturers.com/aprende-sobre-el-sistema-hidroponia-nft/>

AguasSIPRA (2016). Guía Básica para Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. Santiago, Chile. Recuperado de: <http://www.aguassipra.cl/wp-content/uploads/2016/08/Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Servidas.pdf>

Agustín, S. (2019). Catedra de edafología: El azufre del suelo. Recuperado de: <https://bit.ly/2PyM7JG>

AMPHOS & Comisión Nacional de Riego (2017). Estudio básico: Diagnóstico para desarrollar un plan de gestión de riego en la región de Antofagasta. Santiago, Chile.

ARCADIS & Dirección General de Aguas (2016). Plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, región de Antofagasta.

ARRAU INGENIERÍA E.I.R.L. & Dirección General de Aguas (2012). Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, región de Antofagasta. Volumen 2. Santiago, Chile. Recuperado de: https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/DGA_Antofagasta_IF_Volumen_2.pdf

Banco Central de Chile (2018) Producto interno bruto por clase de actividad económica, anual, volumen a precios del año anterior encadenado. Recuperado de: https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/informes/BOLETIN/listado/BC003_a004_a_Coment.pdf

Beltrano, J., Gimenez, D. (2015) Cultivos en hidroponía, Buenos Aires, Argentina, Editorial de la Universidad de La Plata. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1

Biblioteca del Congreso Nacional (2007). Mapa Región de Antofagasta. Recuperado el 18 de abril, 2020, de: <https://reportescomunales.bcn.cl/2011/index.php/Antofagasta>

Biblioteca del Congreso Nacional (2007). Mapa Región de Coquimbo. Recuperado el 18 de abril, 2020, de: <https://reportescomunales.bcn.cl/2011/index.php/Coquimbo>

Blake-Kalff, M.M.A., K.R. Harrison, M.J. Hawkesford, F.J. Zhao, S.P. McGrath (1998). Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiol.* 118(4):1337-1344. doi: 10.1104/pp.118.4.1337

Bonanno, G., Lo Giudice, R. (2010) Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecological Indicators.* 10 (3), 639-645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.002>

Brakemeier, D. (2015) Evaluación económica entre osmosis inversa y desalinización solar térmica.

Cabrera, C. (2018). Nutrición y salud pública: Riesgos y oportunidades para el futuro. IANAS, Oportunidades y desafíos para la investigación en agricultura, y en seguridad alimentaria y nutricional de las Américas (pp. 11-18). México: IANAS-IAP.

Carrasco, G., Izquierdo, J. (1996) Manual técnico: La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva ("NFT"). Talca, Chile, Universidad de Talca. Recuperado de: <http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/2927/1/NFT.pdf>

Climate-Data.org (2020). Lasana Clima. Recuperado de: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/ii-region-de-antofagasta/lasana-877510/>

CNR (diciembre 2017). *Estudio básico: Diagnóstico recursos hídricos en riego sustentable cuenca río Loa y Salado*. Recuperado de: http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26932/CNR-0471_2.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Comisión de Minería y Energía de la Cámara de Diputados (2017) Análisis económico de aspectos asociados a la desalinización del agua en la minería. Disponible en: <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmlD=114031&prmtIPO=DOCUMENTOCOMISION>

Comisión Nacional de Agua (2015) Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS) (pp. 6-8). México. Recuperado de: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf>

Comisión Nacional de Agua (2015) Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Procesos avanzados con fines de reúso. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS) (pp. 6-8). México. Recuperado de: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro35.pdf>

Comisión Nacional de Riego (2007). Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego. Santiago, Chile.

Corroto, C., Iriel, A., Fernández, A., Pérez, A.L. (2019) Constructed wetlands as an alternative for arsenic removal from reverse osmosis effluent. *Science of the Total Environment*. 691, 1242-1250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.234>

Courel, F. (2019) Guía de estudio: Suelos salinos y sódicos, Facultad de agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional Tucumán. Recuperado de: <https://bit.ly/2TpOeAB>

Decreto con fuerza de ley N° 1122, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Santiago, Chile, 13 de agosto de 1981.

Decreto con fuerza de ley N° 1775, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Santiago, Chile, 30 de mayo de 1995.

Decreto con fuerza de ley N° 725, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Santiago, Chile, 11 de diciembre de 1967.

Decreto supremo N° 90, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Santiago, Chile, 30 de mayo de 2000.

Department of Water Affairs and Forestry, 1996. South African Water Quality Guidelines (second edition). Volume 4: Agricultural Use: Irrigation.

Dirección General de Aguas (2012). Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, región de Antofagasta.

Dirección General de Aguas (2017). Diagnóstico de calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (2019). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Recuperado de: https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_05_Mayo_2019.pdf

Dirección General de Aguas (s.f.). Demo Acuíferos Estudiados en Arcgis [mapa]. Recuperado el 18 de abril, 2020, de: <https://www.arcgis.com/apps/MapTools/index.html?appid=02716ecb71204fbd8302681b28f492f5>

Dirección General de Aguas. (2016). Cap. 2 Nuestra agua. En Atlas del Agua (pp. 48). Santiago, Chile. Recuperado de: <https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte2-17marzo2016b.pdf>

Dirección General de Aguas. (2016). Cap. 4 Gestión de agua. En Atlas del Agua (pp. 125). Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (2017). Volumen II: Resultados y análisis de la estimación de la demanda hídrica actual y calidad de agua. En: Estimación actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile.

DIRECON-PROCHILE (2018). Exportación de mercancías. Sectores y Mercados. Recuperado de: https://www.prochile.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/anuario_servicios_capitulo1_bienes_2018.pdf

Elimelech, M., Phillip, W. (2011) Review: The future of seawater desalination: Energy, Technology, and the environment. 33 (6043), 712-717. doi: 10.1126/science.1200488

Escenarios Hídricos 2030. (2018). Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Escuela de organización industrial (2014). Informe de vigilancia tecnológica: Tendencias en tecnologías del agua. Madrid, España.

Espigares, M., Pérez, J. (s.f.) Aguas residuales: Composición. Recuperado de: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

FAO (1994) Water quality for agriculture. California, USA. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm>

Fraunhofer Chile (2017) Estudio de tecnología de membranas de destilación. Santiago, Chile.

Frtizmann, C., Löwenberg, Wintgens, T., Melin, T. (2007) State-of-art of reverse osmosis desalination, 216, 1- 76. doi: 10.1016/j.desal.2006.12.009

Fundación Chile. (2016). Aguas residuales como nueva fuente de agua: diagnóstico del potencial de reúso de aguas residuales en la región de Valparaíso. Recuperado de: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/aguas-residuales-como-fuente-de-agua.pdf>

Fundación Chile. (2018). Claves para la gestión de aguas residuales rurales: Primera planta de reúso de aguas tratadas en la región de Coquimbo, una experiencia replicable. Recuperado de: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/claves-para-la-gestion-de-aguas-residuales.pdf>

García, A. (2012), Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego (segunda parte). Recuperado de: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/\\$FILE/Art%205.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/$FILE/Art%205.pdf)

Gobierno Regional de Coquimbo (2015), Plan estratégico para enfrentar la escasez hídrica 2015-2025. Recuperado de: <http://onemi.gorecoquimbo.gob.cl:81/publico/Plan%20Estratégico%20Escasez%20H%C3%ADrica%20RdeCoquimbo%202015-2025%20OK.pdf>

Grant, C., Hawkesford, M. (2015). Sulfur. Barker, A., Pilbeam, D. (Eds.), Handbook of Plant Nutrition (pp. 261-302). Florida, EE.UU: CRC Press.

Grattan, S. (2018) Consejo sobre la sequía: La tolerancia del cultivo a la sal. Universidad de California, agricultura y recursos naturales. Recuperado de: <https://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/8630.pdf>

Grattan, S. (2018) Consejos sobre la sequía: Calidad del agua para cultivos de verduras y en línea. Universidad de California, agricultura y recursos naturales. Recuperado de: <https://escholarship.org/content/qt5pr5d3ss/qt5pr5d3ss.pdf?t=prnju7>

Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mechanisms of Salt Tolerance in Nonhalophytes. Annual Review of Plant Physiology, 31(1), 149–190. doi:10.1146/annurev.pp.31.060180.001053

Greipsson, S. (2011) Phytoremediation. Nature Education Knowledge 3(10):7

GroHo (2020). El Forraje Verde Hidropónico. Recuperado el 1 de mayo, 2020, de: <https://www.groho.es/post/el-forraje-verde-hidroponico>

Guadalupe, C. (2019) Humedales de tratamiento para remoción de arsénico del rechazo de un sistema de purificación de agua por ósmosis inversa. Universidad autónoma de Chihuahua, México.

Hodson de Jaramillo, E. (2018). Oportunidades con que cuenta la ciencia, la tecnología y la innovación para aumentar la eficiencia y la competitividad de la producción agrícola sostenible en las Américas. IANAS, Oportunidades y desafíos para la investigación en agricultura, y en seguridad alimentaria y nutricional de las Américas (pp. 23-30). México: IANAS-IAP.

Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (2007), Censo Agropecuario. Recuperado el 18 de abril, 2020, de: <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>

Instituto nacional de estadísticas en Chile (INE) (2002). Censo 2002. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.ine.cl/docs/default-source/censo-de-poblacion-y-vivienda/publicaciones-y-anuarios/2002/sintesis-censal-2002.pdf>

Instituto Nacional de Estadísticas, 2019. Agricultura, agroindustria y pesca. Recuperado de: Instituto Nacional de Estadísticas, 2019. Agricultura, agroindustria y pesca.

Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies, Texas Agricultural Extensión Service, The Texas A&M University System, 1996. Recuperado de: <http://cotton.tamu.edu/Irrigation/salinitydocument.pdf>

Janick F. et al. (2004). Environmental Monitoring and Characterization.

K. Krumova, M. Nikolovska & V. Groudeva (2008) Isolation and Identification of Arsenic-Transforming Bacteria from Arsenic Contaminated Sites in Bulgaria, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 22:2, 721-728, DOI: 10.1080/13102818.2008.10817541

Kadlec, Robert & Wallace, Scott. (2008). *Treatment Wetlands*, Second Edition.

Kopsell, D.E., Kopsell, D.A. (2015). Chlorine. Barker, A., Pilbeam, D. (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 349-366). Florida, EE.UU: CRC Press.

Leal, M.T. (s.f.) *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Solar Safe Water.

Leentech B. V. (1998-2020) *Water Treatment Solutions*. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/>

Ley N° 21.075, Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 15 de febrero de 2018.

M. Abdallah, L. Dubousset, F. Meuriot, P. Etienne, J-C. Avice, A. Ourry (2010). Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L., *Journal of Experimental Botany*, Volume 61(10), 2635–2646. doi: 10.1093/jxb/erq096

McPhee, J., De la Fuente, A., Herrera, P., Niño, Y., Olivares, M., Sancha, A., Vargas, X. (2012). El sector del agua en Chile. Su estado y sus retos. In B. Jiménez Cisneros & J. (GaliziaTundisi, Diagnóstico del Agua en las Américas (pp. 169-192)). Ciudad de México: Red Interamericana de Academias de Ciencias y Foro Consultivo y Tecnológico.

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2019). Quinta Encuesta Longitudinal de Empresas. Recuperado de: https://www.economia.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/ELE-5-Principales_resultados.pdf

Ministerio de obras públicas (2020). Mesa nacional del agua: Primer informe. Recuperado de: https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf

Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2017). Plan Chile 30/30. Obras Públicas y Agua para el Desarrollo [PowerPoint]. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/11849238/>

Mordojovich S. (2009). Bombeo y tratamiento como alternativa para la limpieza de acuíferos.

Moscoso, J., Juarez H. & Alfaro, T. 2008. The Use of reservoirs to improve the quality of Urban Irrigation Water. Urban Agriculture Magazine No. 20. Resource Centre on Urban Agriculture and Food Security - RUA Foundation. The Netherlands (disponible en: <https://ruaf.org/assets/2019/11/Urban-Agriculture-Magazine-no.-20---Water-for-Urban-Agriculture.pdf>

NGS New Growing System (2020). Sistema NGS Multi-banda. Recuperado el 1 de mayo, 2020, de: <http://ngssystem.com/es/ngs/multibanda>

Norma Chilena Oficial N° 1333. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile, 15 de junio de 1978 modificada en 8 de mayo de 1987.

Novedades Agrícolas (2016-2020). Riego Hidropónico. Recuperado de: <https://www.novagric.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-hidroponico>

ODEPA (2014). El Mercado del tomate para consumo fresco. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/tomate2014.pdf>

Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2017). Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe: Estado, principios y necesidades. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>

Pastén, P., Vega, A., Guerra, P., Pizarro, J., Lizama, K. (2019). Calidad del agua en Chile: Avances, desafíos y perspectivas. En IANAS (Ed.), Calidad del agua en las Américas: Riesgos y oportunidades (pp. 169-200). México. Recuperado de: <https://www.ianas.org/images/books/wb9d.pdf>

PortalFrutícola (2019). Pasos para fabricar un sistema NFT hidropónico muy sencillo y barato. Recuperado el 1 de mayo, 2020, de: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2019/01/31/pasos-para-fabricar-un-sistema-nft-hidroponico-muy-sencillo-y-barato/>

Primera Edición (2019, 26 de octubre). Señalan ventajas de cultivar sin suelo con la hidroponía. Recuperado de: <https://www.primeraedicion.com.ar/nota/100189139/senalan-ventajas-de-cultivar-sin-suelo-con-la-hidroponia/>

Pure Aqua (2000-2020). Osmosis inversa & sistemas de tratamiento de agua. Recuperado de: <https://es.pureaqua.com/>

Rangel, E., Montañez, L., Luévanos, M., Balagurusamy, N. (2015) Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n2/2395-8030-tl-33-02-00103.pdf>

Rivas, C. (2018, 05 de octubre). Fuerte caída en los costos reabre las ganas de desalinizar agua. *La Segunda*, p. 21.

Rivas, G., D'etigny, M. (2016) Ciencia e Innovación para los desafíos futuros del agua en Chile. Estrategia Nacional de investigación, Desarrollo e innovación para la sostenibilidad de los recursos hídricos.

Rodríguez, R., et al. (2008). Gestión y Tratamiento de agua subterránea.

Saavedra, A., (s.f.) Desalinización de agua de mar: Respuesta a las necesidades de agua para el norte de Chile. [Diapositivas PowerPoint]. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/10197877/>

SAG (2018). Servicio Agrícola y Ganadero. Recuperado de: <https://www2.sag.gob.cl/reqmercado/default.asp>

San Miguel – Espinosa et al. (2019). "Boron & Sulfate", *BioResources* 14(1), 363-375.

San Miguel Espinosa, C. (2017) Optimización de la remoción de boro usando humedales construidos de flujo subsuperficial: caso del río Azufre, Norte de Chile. Memoria para optar al título de ingeniería civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Sanz, J., (2015) Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración. *Revista Rocas y Minerales*, pp. 40-42. Recuperado de: http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/2/41286,Rocas-y-Minerales_Noviembre2015.pdf

Sarma, Hemen. (2011). Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology. *Journal of Environmental Science and Technology*. 4. 10.3923/jest.2011.118.138.

Savva, A., Frenken, K. (2002) Module 4: Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling, Irrigación Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture With Farmer Participation. Harare, Zimbabwe, FAO-SAFR. Recuperado de: http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/ESPIM/CD-ROM/documents/711_e.pdf

Sheoran, A.S., Sheoran, V. (2006) Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. Minerals Engineering. 19 (2), 105-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.006>

Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (Snifa) (2019). Autocontrol planta tratamiento aguas servidas El Peñón. Segundo trimestre 2019. Recuperado de: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/SeguimientoAmbiental/Ficha/89926>

Stolz J.F., Basu, P., Oremland R.S. (2002) Microbial transformation of elements: the case of arsenic and selenium. International Microbiology, 5(4), 201-207. Doi: 10.1007/s10123-002-0091-y

SUBDERE. (2012). Resumen Catastro Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, Sector Rural. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/read/28707209/resumen-catastro-plantas-de-tratamiento-subdere>

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) (2020). Gobierno regional de Coquimbo. Recuperado de: <http://www.subdere.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-de-coquimbo>

Sud-Austral Consulting SpA. (2016). Actualización de cifras y mapas de desertificación; degradación de la tierra y sequía en Chile a nivel de comunas. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://bit.ly/2RH0omQ>

Sun, G., & Cooper, D. (2008). A STATISTICAL ANALYSIS ON THE REMOVAL OF ORGANIC MATTER IN SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS IN THE UK. Environmental Technology, 29(10), 1139–1144. doi:10.1080/09593330802217765

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2015). Informe: Reúso de aguas servidas tratadas.

Tapia, B. (2002) Descripción del mercado de las lechugas. Recuperado de: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/descripcion-del-mercado-de-las-lechugas-2002>

Tsai, S.-L., Singh, S., & Chen, W. (2009). Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. Current Opinion in Biotechnology, 20(6), 659-667. Doi: 10.1016/j.copbio.2009.09.013.

UNAP (2017) Presentación Cristian Wedeles. Desalinización: El mar como fuente de agua para el norte de Chile. Disponible en:

http://www.unap.cl/prontus_ciderh/site/artic/20140807/asocfile/20140807180625/presentacion_cristian_wedeles.pdf

USDA (1993), Irrigation Water Requirements, Chapter 2. Recuperado de: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch2.pdf>

Uthus, E.O. (1992) Evidence for arsenic essentiality. *Environmental Geochemistry and Health*, 14(2), 55-58. Doi: 10.1007/bf01783629

Vega A.S., Lizama K., Pastén P.A. (2018) Water Quality: Trends and Challenges. In: Donoso G. (eds) *Water Policy in Chile. Global Issues in Water Policy*, vol 21. Springer, Cham

Velasco, J. (2017). *La crisis del agua en Chile: 110 acuíferos sobre otorgados y desconocimiento sobre el uso real de los derechos*. Recuperado el 20 de Febrero de 2020, de Red agrícola website: <http://www.redagricola.com/cl/la-crisis-del-agua-chile-110-acuiferos-otorgados-desconocimiento-uso-real-los-derechos/>

Vidal, C. (2015) Tecnologías emergentes & no convencionales. Santa Cruz, Bolivia. [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: <https://bit.ly/39e9r7B>

Vidal, G., Araya, F. (2014) Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: Situación actual y desafíos. Capítulo 1, p. 16. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/322851949_Las_aguas_servidas_y_su_depuracion_en_zonas_rurales_situacion_actual_y_desafios

Vidal, G., Jarpa, M., Plaza, C., Belmonte, M., Mariangel L. (s.f.) Sistemas de tratamiento Convencionales vs. Sistemas Naturales. Peñuela, G., Morató, J. (Eds.), *Manual de tecnologías sostenibles en tratamientos de aguas* (pp. 29-44). Red ALFA TECSPAR.

Vymazal, J. (2008) Review: The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*. 35 (1), 1-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>

Vymazal, J. (2011) Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia* 674, 133-156. doi: <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>

Wu et al. (2015) A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*. 175, 594-601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>

Xavier, S., Ballester, J., Llorens, J., García, J. (2014). Ósmosis directa: proceso y aplicaciones. *Tecnoaqua*. 7, 26-32.

Xu, G., Magen, H., Tarchitzky, J., & Kafkafi, U. (1999). Advances in Chloride Nutrition of Plants. *Advances in Agronomy*, 97–150. doi:10.1016/s0065-2113(08)60844-5

Zárate, M. (2015) Manual de hidroponía, Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf

Zhihao et al. (2019) Mechanism and performance of trace metal removal by continuous-flow constructed wetlands coupled with a micro-electric field. Water research. 16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114937>

9. Anexos

Anexo 1: Límites de concentraciones recomendadas para metales pesados en aguas de riego. Fuente: Irrigation water quality standards and salinity management strategies, Texas agricultural extension service, the Texas A&M University System, 1996.

Límite de concentración recomendado en las aguas de riego (mg/l)			
Elemento	Concentración máxima recomendada en largos periodos de riego (mg/l)	Concentración máxima recomendada en cortos periodos de riego (mg/l)	Observaciones
Aluminio (Al)	5.0	20	Puede producir improductividad de suelos ácidos, pero en suelos de pH entre 5 y 8 puede precipitarse el Al eliminando la toxicidad de este.
Arsénico (As)	0.10	2.0	Tóxico para las plantas, varía desde niveles de 12 mg/l a 0.05 mg/l según el cultivo.
Berilio (Be)	0.75	2.0	Tóxico para las plantas, varía desde niveles de 5 mg/l a 0.5 mg/l según el cultivo.
Cadmio (Cd)	0.01	0.05	Tóxico para Remolacha, Habas y Nabos a concentraciones inferiores a 0.1 mg/l.
Cromo (Cr)	0.1	1.0	No incluido como elemento esencial para el crecimiento vegetal. Se recomienda estos límites dada la falta de conocimiento de toxicidad en cultivos
Cobalto (Co)	0.05	5	Tóxico para el tomate en concentraciones de 1 mg/l en soluciones nutritivas. Tiene tendencia a neutralizarse en suelos alcalinos y ácidos.
Cobre (Cu)	0.2	5.0	Tóxico para numerosos cultivos en concentraciones entre 0.1 a 1.0 mg/l en soluciones nutritivas. Inactivado por suelos neutros y alcalinos.
Fluoruros (F)	1.0	15.0	Inactivado en suelos alcalinos.
Hierro (Fe)	5.0	20.0	No tóxico en suelos bien aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y a la inactivación de factores esenciales como el fósforo y molibdeno
Plomo (Pb)	5.0	10.0	Puede inhibir el crecimiento celular de plantas a concentraciones muy altas.
Litio (Li)	2.5	2.5	Ampliamente tolerado por muchos cultivos a concentraciones superiores a los 5 mg/l. en suelos bien drenados. Tóxico para cítricos en concentraciones bajas siendo su concentración máxima recomendada de 0.075 mg/l.
Manganeso (Mn)	0.2	10.0	Tóxico para algunos cultivos a pequeñas concentraciones en suelos ácidos
Molibdeno (Mo)	0.01	0.05	No tóxico para cultivos en condiciones normales de concentración tanto en suelos como en aguas de riego. Puede ser tóxico para el ganado alimentado con forraje cultivado en suelos con altos contenidos en molibdeno disponible.
Níquel (Ni)	0.2	2.0	Tóxico para numerosos cultivos a concentraciones entre 0.5 y 1.0 mg/l, puede reducirse su toxicidad en suelos alcalinos y neutros.
Selenio (Se)	0.02	0.02	Tóxico para numerosos cultivos a bajas concentraciones de Selenio. Puede ser tóxico también para el ganado alimentado con forraje cultivado en suelos con selenio.
Vanadio (V)	0.1	1.0	Tóxico para muchos cultivos a concentraciones relativamente bajas.
Zinc (Zn)	2.0	10.0	Tóxico para muchos cultivos, puede ser reducida su toxicidad con el incremento del pH (6 o superior) y en texturas finas o suelos orgánicos.

Anexo 2: Medidas de control para disminuir la presencia de patógenos en los cultivos regados con aguas servidas tratadas.

Fuente: Conagua, 2015.

Medida de control	Remoción de patógenos (unidades log)	Comentarios
Tratamiento de aguas residuales	1-6	La remoción de patógenos requerida depende de la combinación selectiva de medidas de control para la protección de la salud.
Riego por goteo en cultivos de bajo crecimiento	2	Tubérculos y hortalizas, como lechuga, que crecen justo sobre el suelo con contacto parcial.
Riego por goteo en cultivos de alto crecimiento	4	Cultivos en los que las partes a cosechar no están en contacto con el suelo, como tomates.
Inactivación de patógenos por decaimiento	0.5-2 por día	Es la reducción del número de patógenos por decaimiento que ocurre entre el último riego y el consumo final. La meta en la remoción de unidades log depende de condiciones climáticas(temperatura, intensidad solar) tipo de cultivo, etc.
Lavado con agua	1	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con agua limpia.
Desinfección	2	Lavado de hortalizas, vegetales y frutas con una solución diluida de desinfectante y enjuague con agua limpia.
Pelado	2	Frutas y tubérculos.

En los anexos 3, 4, 5, 6, 7, se muestran algunas características destacables de algunos tratamientos terciarios comunes.

Anexo 3: Resumen de tecnologías de remoción mediante procesos que utilizan rayos UV y ozono. Fuente: Elaboración propia a partir de CNR, 2007: Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego.

Tecnología	UV	Ozono
Descripción/uso	Remoción de bacterias por daño en sus genes usando rayos UV.	Remoción de bacterias y pesticidas por alteración electroquímica de su estructura.
Parámetros que afectan el funcionamiento	-Horas de uso de lámpara. -Falta de limpieza de lámpara. -Transmitancia y presencia de sólidos suspendidos.	-La temperatura y humedad del aire afectan la producción de Ozono por el generador. -Turbiedad. -Variaciones de voltajes/corriente. -pH > 6 - 8 y alcalinidad afectan estabilidad del ozono. -Presiones < 10 psi afectan solubilidad del ozono.

Anexo 4: Resumen de mecanismos de filtración por cartuchos, con bolsa, microfiltración y ultrafiltración. Fuente: Elaboración propia a partir de CNR, 2007: Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego.

Tecnología	Filtración por cartucho	por	Filtración con bolsa	Microfiltración y ultrafiltración
Descripción/uso	Remoción por exclusión de bacterias y partículas sólidas.	por de	Remoción por exclusión de bacterias y partículas sólidas.	Remoción por exclusión de microorganismos para ambos y partículas/plaguicidas respectivamente.
Parámetros que afectan el funcionamiento	-Turbiedad > 1-5 NTU o SS > 25mg/l -Formación de películas biológicas. -Incorrecta instalación o daño en el filtro.		-Mala instalación de bolsas/sellos gastados. -Turbiedad > 1 - 5 NTU. -Aumentos de caudal/presión que puedan romper la bolsa. -Formación de películas biológicas.	-Daños en membranas. -Limpieza y/o mantenimiento inapropiado. -Retrolavado con agua de mala calidad. -Precipitación de Hierro y Manganeseo en la membrana. - Trabajan a 0.1 – 5 bar y 1 – 10 bar respectivamente. Mayores o menores presiones afectan el rendimiento y vida útil.
Tamaño membrana	0.1 – 1 micra, con disminución a 0.005 – 0.15 micra (Nominal – Absoluto) *		0.45 – 50 micras	0.09 a 1 micra para microfiltración. 0.001 a 0.1 micra para ultrafiltración.

*Nota: Tamaño nominal hace referencia a un 95% de remoción, y absoluto a una remoción del 99%.

Anexo 5: Resumen de mecanismos de remoción mediante nanofiltración y osmosis inversa. Fuente: Elaboración propia a partir de CNR, 2007: Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego.

Tecnología	Nanofiltración	Osmosis inversa
Descripción/uso	Remoción de sustancias orgánicas, SS, microcontaminantes, algunos iones multivalentes, entre otros, mediante la exclusión por membrana.	Difusión de agua a través de una membrana semi permeable desde una solución de alta concentración de SDT a una de baja concentración mediante el aumento de presión aplicada por una bomba.
Parámetros que afectan el funcionamiento	Concentración salina inicial: 200-5000 mg/L. -Presión de trabajo 7 - 14 bar -Daños en membrana, suciedad, mantenimiento y mala operación.	Tipo de membrana - Presión ejercida y admisible - Fenómeno de scaling (incrustación de minerales en la membrana) y fouling (presencia de microorganismos en la membrana) - Temperatura - Trabaja a 10 – 100 bar
Tamaño membrana	1 nm o mayores	0.1 nm o mayores.

Anexo 6: Resumen de mecanismos de remoción mediante electrodiálisis reversa y adsorción con carbón activado. Fuente: Elaboración propia a partir de CNR, 2007: Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego.

Tecnología	Electrodiálisis reversa	Adsorción (Carbón activado)
Descripción/uso	Remueve iones positivos o negativos mediante membranas selectivas y campos magnéticos.	Remueve iones, en particular As, con alta eficiencia, y plaguicidas mediante la adsorción no selectiva.
Parámetros que afectan el funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial ensuciamiento biológico. - Temperatura del agua. - Variaciones en la turbiedad del agua a tratar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de concentración de compuestos similares en tamaño y propiedades al del contaminante. - Películas biológicas. - Variaciones de Temperatura y pH. - Retrolavado ineficiente.
Requerimientos	<ul style="list-style-type: none"> - SDT entre 400 y 3500 mg/l. - Ausencia de SS > 10 micras. - Turbiedad < 2 NTU. - Aceites y grasas < 1mg/l. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aceites < 10mg/l. -Bajo contenido de macromoléculas fácilmente degradables. - Concentración de iones < 500mg/l

Anexo 7: Mecanismos de remoción mediante intercambio iónico en general y particularmente con alúmina activada. Fuente: Elaboración propia a partir de CNR, 2007: Manual de tecnologías para mitigar la contaminación de las aguas de riego.

Tecnología	Intercambio Iónico	Intercambio Iónico (Alúmina activada)
Descripción/uso	Remueve con gran eficiencia iones en concentraciones pequeñas mediante mecanismos de adsorción por resinas.	Remoción de As por intercambio iónico. Es simple y seguro.
Parámetros que afectan el funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Descenso de la temperatura del agua. - Químicos oxidantes. - Presencia de iones con más afinidad. - Uso de cantidad inapropiada de solución regenerante. - Tiempo insuficiente de contacto con solución regenerante. - Colmatación de resinas por partículas de Hidróxido Férrico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tasa del intercambio iónico. - Remoción en función de la cantidad de alúmina activada. - Limpieza del sistema. - Mantenimiento. - Tiempo de contacto con la solución.
Requerimientos	<ul style="list-style-type: none"> - pH 6.5 a 9. - SS < 10mg/l - SDT < 500-800 mg/l - Sulfato < 50mg/l - Turbiedad < 0.3 NTU - Nitrato < 5mg/l - Ausencia de aceites y grasas. - Dureza > alcalinidad 	<ul style="list-style-type: none"> - pH 5.5 a 6 - Cloruro < 250mg/l - Sulfato < 360 mg/l - Hierro < 0.5 mg/l - Manganeso < 0.05 mg/l - COT < 4mg/l - Sílice < 30mg/l - SDT < 1000 mg/l

Anexo 8: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para San Pedro de Atacama. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
Invernadero					\$ 28.417.200	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	12	\$ 2.368.100	\$ 28.417.200	Agromarket
Sistema NFT			41		\$ 30.606.539	
	Tubería PVC 110 mm de 6m de largo	Un	861	\$ 6.890	\$ 5.932.290	Sodimac
	Codo PVC 110 mm	Un	164	\$ 1.390	\$ 227.960	Sodimac
	Copla PVC 110 mm	Un	410	\$ 1.440	\$ 590.400	Sodimac
	Tapa PVC cementar 110x50 mm	Un	861	\$ 870	\$ 749.070	Sodimac
	Conector cinta polietileno 16 mm	Un	33.620	\$ 490	\$ 16.473.800	Sodimac
	Cañería polietileno 16 mm 200 m	Un	41	\$ 32.590	\$ 1.336.190	Sodimac
	Tee milimétrica 16 mm granel	Un	369	\$ 151	\$ 55.719	Koslan
	Codo PE 16mm	Un	41	\$ 114	\$ 4.674	SercoRiego
	Bomba sumergible SICCE ULTRA ZERO	Un	41	\$ 85.556	\$ 3.507.796	PuntoHidraulico
	Timer Digital de 20 tiempos	Un	41	\$ 10.090	\$ 413.690	Sodimac
	Estanque vertical polietileno 1.000 lt	Un	10	\$ 109.990	\$ 1.099.900	Easy
	Estanque vertical polietileno 500 lt	Un	1	\$ 64.990	\$ 64.990	Easy
	Pegamento PVC Vinilit 240cc	Un	41	\$ 2.170	\$ 88.970	Sodimac
	Mini válvula PVC 16x16 mm	Un	41	\$ 1.490	\$ 61.090	Sodimac
Trasplante					\$ 15.839.458	
	Cilindros Foamin Agrícola para NFT	Un	60.516	MXN 1,99	\$ 5.539.635	Hydroenv
	Canastilla hidroponía de 1 pulgada 3/4 con perforación	Un	60.516	MXN 3,70	\$ 10.299.823	Hydroenv

Anexo 8: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para San Pedro de Atacama. No se considera el fertilizante. (Continuación)
Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
Base PVC			41		\$ 2.646.960	
	Tubería PVC 32mm x 3 metros	Un	820	\$ 2.990	\$ 2.451.800	Sodimac
	Codo PVC 32 mm 90°	Un	574	\$ 340	\$ 195.160	Sodimac
	Tee soldar tigre 32 mm	Un	656	\$ 490	\$ 321.440	Sodimac
Germinación					\$ 20.922.300	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	12.136	\$ 1.500	\$ 18.204.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	41	\$ 6.500	\$ 266.500	Humuschile
	Semillas de lechuga bartimer (5000 semillas)	Un	41	\$ 59.800	\$ 2.451.800	
	Planta de tratamiento de aguas servidas 15.400 lt.					
Tratamiento	Sucursal Calama. Caudal admisible: 10.750 lt/día.	Un	1	\$ 7.789.177	\$ 7.789.177	Bioplastic
					Total sin PTAS	\$ 98.432.457
					Total Con PTAS	\$ 106.221.634

Anexo 9: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector PTAS en Coquimbo. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
Invernadero					\$ 9.472.400	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	4	\$ 2.368.100	\$ 9.472.400	Agromarket
Sistema NFT			11		\$ 4.994.949	
	Tubería PVC 110 mm de 6m de largo	Un	231	\$ 6.890	\$ 1.591.590	Sodimac
	Codo PVC 110 mm	Un	44	\$ 1.390	\$ 61.160	Sodimac
	Copla PVC 110 mm	Un	110	\$ 1.440	\$ 158.400	Sodimac
	Tapa PVC cementar 110x50 mm	Un	231	\$ 870	\$ 200.970	Sodimac
	Conector cinta polietileno 16 mm	Un	2420	\$ 490	\$ 1.185.800	Sodimac
	Cañería polietileno 16 mm 200 m	Un	11	\$ 32.590	\$ 358.490	Sodimac
	Tee milimétrica 16 mm granel	Un	99	\$ 151	\$ 14.949	Koslan
	Codo PE 16mm	Un	11	\$ 114	\$ 1.254	SercoRiego
	Bomba sumergible SICCE ULTRA ZERO	Un	11	\$ 85.556	\$ 941.116	PuntoHidraulico
	Timer Digital de 20 tiempos	Un	11	\$ 10.090	\$ 110.990	Sodimac
	Estanque vertical polietileno 1.000 lt	Un	3	\$ 109.990	\$ 329.970	Easy
	Pegamento PVC Vinilit 240cc	Un	11	\$ 2.170	\$ 23.870	Sodimac
	Mini válvula PVC 16x16 mm	Un	11	\$ 1.490	\$ 16.390	Sodimac
Trasplante					\$ 1.140.139	
	Cilindros Foamin Agrícola para NFT	Un	4356	MXN 1,99	\$ 398.748	Hidroenv
	Canastilla hidroponía de 1 pulgada 3/4 con perforación	Un	4356	MXN 3,70	\$ 741.391	Hidroenv
Base PVC			11		\$ 710.160	
	Tubería PVC 32mm x 3 metros	Un	220	\$ 2.990	\$ 657.800	Sodimac
	Codo PVC 32 mm 90°	Un	154	\$ 340	\$ 52.360	Sodimac

Anexo 9: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector PTAS en Coquimbo. No se considera el fertilizante. (continuación)

Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
	Tee soldar tigre 32 mm	Un	176	\$ 490	\$ 86.240	Sodimac
Germinación					\$ 2.049.300	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	880	\$ 1.500	\$ 1.320.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	11	\$ 6.500	\$ 71.500	Humuschile
	Semillas de lechuga bartimer (5000 semillas)	Un	11	\$ 59.800	\$ 657.800	
Tratamiento						
	PLANTA DE TRATAMIENTO 3250 LTS. Sucursal La Serena	Un	1	\$ 3.126.682	\$ 3.126.682	Bioplastic
Total Sin PTAS					\$ 18.366.948	
Total Con PTAS					\$ 21.493.630	

Anexo 10: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector Lasana. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
Invernadero					\$ 2.368.100	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	1	\$ 2.368.100	\$ 2.368.100	Agromarket
Sistema NFT			2,5		\$ 1.032.903	
	Tubería PVC 110 mm de 6m de largo	Un	53	\$ 6.890	\$ 365.170	Sodimac
	Codo PVC 110 mm	Un	10	\$ 1.390	\$ 13.900	Sodimac
	Copla PVC 110 mm	Un	25	\$ 1.440	\$ 36.000	Sodimac
	Tapa PVC cementar 110x50 mm	Un	53	\$ 870	\$ 46.110	Sodimac
	Conector cinta polietileno 16 mm	Un	127	\$ 490	\$ 62.230	Sodimac
	Cañería polietileno 16 mm 200 m	Un	3	\$ 32.590	\$ 97.770	Sodimac
	Tee milimétrica 16 mm granel	Un	23	\$ 151	\$ 3.473	Koslan

Anexo 10: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector Lasana. No se considera el fertilizante. (continuación)
Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
	Codo PE 16mm	Un	3	\$ 114	\$ 342	SercoRiego
	Bomba sumergible SICCE ULTRA ZERO	Un	3	\$ 85.556	\$ 256.668	PuntoHidráulico
	Timer Digital de 20 tiempos	Un	3	\$ 10.090	\$ 30.270	Sodimac
	Estanque vertical polietileno 1.000 lt	Un	1	\$ 109.990	\$ 109.990	Easy
	Pegamento PVC Vinilit 240cc	Un	3	\$ 2.170	\$ 6.510	Sodimac
	Mini válvula PVC 16x16 mm	Un	3	\$ 1.490	\$ 4.470	Sodimac
Trasplante					\$ 58.892	
	Cilindros Foamin Agrícola para NFT	Un	225	MXN 1,99	\$ 20.597	Hidroenv
	Canastilla para hidroponía de 1 pulgada 3/4 con perforación	Un	225	MXN 3,70	\$ 38.295	Hidroenv
Base PVC			2,5		\$ 159.020	
	Tubería PVC 32mm x 3 metros	Un	50	\$ 2.990	\$ 149.500	Sodimac
	Codo PVC 32 mm 90°	Un	28	\$ 340	\$ 9.520	Sodimac
	Tee soldar tigre 32 mm	Un	32	\$ 490	\$ 15.680	Sodimac
Germinación					\$ 266.400	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	45	\$ 1.500	\$ 67.500	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	3	\$ 6.500	\$ 19.500	Humuschile
	Semillas de lechuga bartimer (5000 semillas)	Un	3	\$ 59.800	\$ 179.400	
				Total	\$ 3.885.315	

Anexo 11: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector PTAS el Peñón. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Item	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
Invernadero					\$ 14.208.600	
	Invernadero macrotunel 8x25 metros	Un	6	\$ 2.368.100	\$ 14.208.600	Agromarket
Sistema NFT			19		\$ 10.162.231	
	Tuberia PVC 110 mm de 6m de largo	Un	399	\$ 6.890	\$ 2.749.110	Sodimac
	Codo PVC 110 mm	Un	76	\$ 1.390	\$ 105.640	Sodimac
	Copla PVC 110 mm	Un	190	\$ 1.440	\$ 273.600	Sodimac
	Tapa PVC cementar 110x50 mm	Un	399	\$ 870	\$ 347.130	Sodimac
	Conector cinta polietileno 16 mm	Un	7220	\$ 490	\$ 3.537.800	Sodimac
	Cañería polietileno 16 mm 200 m	Un	19	\$ 32.590	\$ 619.210	Sodimac
	Tee milimetrica 16 mm granel	Un	171	\$ 151	\$ 25.821	Koslan
	Codo PE 16mm	Un	19	\$ 114	\$ 2.166	SercoRiego
	Bomba sumergible SICCE ULTRA ZERO	Un	19	\$ 85.556	\$ 1.625.564	PuntoHidraulico
	Timer Digital de 20 tiempos	Un	19	\$ 10.090	\$ 191.710	Sodimac
	Estanque vertical polietileno 1.000 lt	Un	5	\$ 109.990	\$ 549.950	Easy
	Estanque vertical polietileno 500 lt	Un	1	\$ 64.990	\$ 64.990	Easy
	Pegamento PVC Vinilit 240cc	Un	19	\$ 2.170	\$ 41.230	Sodimac
	Mini valvula PVC 16x16 mm	Un	19	\$ 1.490	\$ 28.310	Sodimac
Transplante					\$ 3.401.573	
	Cilindros Foamin Agricola para NFT	Un	12996	MXN 1,99	\$ 1.189.654	Hidroenv
	Canastilla para hidroponia de 1 pulgada 3/4 con perforación	Un	12996	MXN 3,70	\$ 2.211.919	Hidroenv
Base PVC			19		\$ 1.226.640	
	Tuberia PVC 32mm x 3 metros	Un	380	\$ 2.990	\$ 1.136.200	Sodimac

Anexo 11: Materiales y costos para la construcción de un sistema NFT para sector PTAS el Peñón. No se considera el fertilizante. (continuación)

Fuente: Elaboración propia.

Construcción	Item	Medida	Unidades	Costo unitario (CLP)	Costo Total (CLP)	Fuente
	Codo PVC 32 mm 90°	Un	266	\$ 340	\$ 90.440	Sodimac
	Tee soldar tigre 32 mm	Un	304	\$ 490	\$ 148.960	Sodimac
Germinación					\$ 5.164.200	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	2603	\$ 1.500	\$ 3.904.500	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	19	\$ 6.500	\$ 123.500	Humuschile
	Semillas de lechuga bartimer (5000 semillas)	Un	19	\$ 59.800	\$ 1.136.200	
Tratamiento						
	PLANTA DE TRATAMIENTO 3250 LTS. Sucursal La Serena	Un	1	\$ 3.126.682	\$ 3.126.682	Bioplastic
					Total Sin PTAS	\$ 34.163.244
					Total Con PTAS	\$ 37.289.926

Anexo 12: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector San Pedro de Atacama. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
Invernadero					\$ 42.625.800	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	18	\$ 2.368.100	\$ 42.625.800	Agromarket
Germinación					\$ 10.656.000	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	198	\$ 1.500	\$ 297.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	1359	\$ 6.500	\$ 8.833.500	HumusChile
	Semillas tomate Runner F1 (1000 semillas)	Un	13,5	\$ 113.000	\$ 1.525.500	SemillariaSanAlfonso
Extra					\$ 23.900	
	Medidor de pH + Medidor de CE + Higrómetro Con Sonda	Un	1	\$ 23.900	\$ 23.900	MercadoLibre
Fertirriego			9		\$ 15.644.249	
	Estanque Vertical polietileno 5000 litros	Un	9	\$ 446.890	\$ 4.022.010	Sodimac
	Bomba para piscina IML AMERICA 1.00 HP 220V	Un	9	\$ 341.790	\$ 3.076.110	Ferreek
	Reducción de 63x50 mm	Un	9	\$ 1.530	\$ 13.770	Sodimac
	Tubería principal 50mm 6m	Un	45	\$ 1.640	\$ 73.800	Sodimac
	Codo PVC 50mm 90°	Un	9	\$ 401	\$ 3.609	Sodimac
	Tee PVC 50mm	Un	9	\$ 1.090	\$ 9.810	Sodimac
	Reducción de 50x32 mm	Un	18	\$ 790	\$ 14.220	Sodimac
	Tubería 32 mm x 6m	Un	36	\$ 2.960	\$ 106.560	Sodimac
	Tee cementar 32 mm	Un	36	\$ 690	\$ 24.840	Sodimac
	Reducción larga m/h cem 32 x 20 mm Hoffens	Un	36	\$ 490	\$ 17.640	Easy
	Tubo PE de 20mm 20 m	Un	126	\$ 18.159	\$ 2.288.034	Aliexpress

**Anexo 12: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector San Pedro de Atacama. No se considera el fertilizante.
(continuación) Fuente: Elaboración propia**

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
	Tee 20mm PE	Un	594	\$ 133	\$ 79.002	Sercoriego
	Tapa gorro PVC cementar 20 mm	Un	594	\$ 90	\$ 53.460	Sodimac
	Gotero autocompensado antidrenante 8 Litros/Hora EDE	Un	9504	\$ 146	\$ 1.387.584	Diplas
	Microtubo 4mm	Metro	4752	\$ 118	\$ 560.736	Diplas
	Estacas de plástico negro de 11 mm para manguera de riego 100 un	Un	99	\$ 1.757	\$ 173.943	MercadoLibre
	Timer digital enchufable 2000 W manual y automático	Un	9	\$ 10.090	\$ 90.810	Sodimac
	Bolsas 10 Macetas Plantas Grandes 40x40 15 lt	Un	954	\$ 3.800	\$ 3.625.200	MercadoLibre
	Sistema venturi de 3/4 "	Un	9		\$ 23.111	Diplas
Tratamiento					\$ 23.367.531	
	PLANTA DE TRATAMIENTO 15400 LTS. Sucursal La Serena (10.750 l/día)	Un	3	\$ 7.789.177	\$ 23.367.531	Bioplastic
Total Sin PTAS					\$ 68.949.949	
Total Con PTAS					\$ 92.317.480	

Anexo 13: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector PTAS en Coquimbo. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
Invernadero					\$ 14.208.600	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	6	\$ 2.368.100	\$ 14.208.600	Agromarket
Germinación					\$ 3.552.000	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	66	\$ 1.500	\$ 99.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	453	\$ 6.500	\$ 2.944.500	HumusChile
	Semillas tomate Runner F1 (1000 semillas)	Un	4,5	\$ 113.000	\$ 508.500	SemilleraSanAlfonso
Extra					\$ 23.900	
	Medidor de pH + Medidor de CE + Higrómetro Con Sonda	Un	1	\$ 23.900	\$ 23.900	MercadoLibre
Fertirriego			3		\$ 5.230.157	
	Estanque Vertical polietileno 5000 litros	Un	3	\$ 446.890	\$ 1.340.670	Sodimac
	Bomba para piscina IML AMERICA 1.00 HP 220V	Un	3	\$ 341.790	\$ 1.025.370	Ferreek
	Reducción de 63x50 mm	Un	3	\$ 1.530	\$ 4.590	Sodimac
	Tubería principal 50mm 6m	Un	15	\$ 1.640	\$ 24.600	Sodimac
	Codo PVC 50mm 90°	Un	3	\$ 401	\$ 1.203	Sodimac
	Tee PVC 50mm	Un	3	\$ 1.090	\$ 3.270	Sodimac
	Reducción de 50x32 mm	Un	6	\$ 790	\$ 4.740	Sodimac
	Tubería 32 mm x 6m	Un	12	\$ 2.960	\$ 35.520	Sodimac
	Tee cementar 32 mm	Un	12	\$ 690	\$ 8.280	Sodimac
	Reducción larga m/h cem 32 x 20 mm Hoffens	Un	12	\$ 490	\$ 5.880	Easy
	Tubo PE de 20mm 20 m	Un	42	\$ 18.159	\$ 762.678	Aliexpress
	Tee 20mm PE	Un	198	\$ 133	\$ 26.334	Sercoriego

Anexo 13: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector PTAS en Coquimbo. No se considera el fertilizante (continuación) Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
	Tapa gorro PVC cementar 20 mm	Un	198	\$ 90	\$ 17.820	Sodimac
	Gotero autocompensado antidrenante 8 Litros/Hora EDE	Un	3168	\$ 146	\$ 462.528	Diplas
	Microtubo 4mm	Metro	1584	\$ 118	\$ 186.912	Diplas
	Estacas de plástico negro de 11 mm para manguera de riego 100 un	Un	33	\$ 1.757	\$ 57.981	MercadoLibre
	Timer digital enchufable 2000 W manual y automático	Un	3	\$ 10.090	\$ 30.270	Sodimac
	Bolsas 10 Macetas Plantas Grandes 40x40 15 lt	Un	318	\$ 3.800	\$ 1.208.400	MercadoLibre
	Sistema venturi de 3/4 "	Un	3	\$ 23.111	\$ 69.333	Diplas
Tratamiento					\$ 7.789.177	
	PLANTA DE TRATAMIENTO 15400 LTS. Sucursal La Serena (10.750 l/día)	Un	1	\$ 7.789.177	\$ 7.789.177	Bioplastic
				Total Sin PTAS	\$ 23.060.879	
				Total Con PTAS	\$ 30.850.056	

Anexo 14: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector Lasana. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
Invernadero					\$ 4.736.200	
	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	2	\$ 2.368.100	\$ 4.736.200	Agromarket
Germinación					\$ 1.184.000	
	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	22	\$ 1.500	\$ 33.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	151	\$ 6.500	\$ 981.500	HumusChile
	Semillas tomate Runner F1 (1000 semillas)	Un	1,5	\$ 113.000	\$ 169.500	SemillariaSanAlfonso
Extra					\$ 23.900	
	Medidor de pH + Medidor de CE + Higrómetro Con Sonda	Un	1	\$ 23.900	\$ 23.900	MercadoLibre
Fertirriego			1		\$ 1.311.903	
	Estanque Vertical polietileno 5000 litros	Un	1	\$ 446.890	\$ 446.890	Sodimac
	Bomba para piscina IML AMERICA 1.00 HP 220V	Un	1	\$ 341.790	\$ 341.790	Ferreek
	Reducción de 63x50 mm	Un	1	\$ 1.530	\$ 1.530	Sodimac
	Tubería principal 50mm 6m	Un	5	\$ 1.640	\$ 8.200	Sodimac
	Codo PVC 50mm 90°	Un	1	\$ 401	\$ 401	Sodimac
	Tee PVC 50mm	Un	1	\$ 1.090	\$ 1.090	Sodimac
	Reducción de 50x32 mm	Un	2	\$ 790	\$ 1.580	Sodimac
	Tubería 32 mm x 6m	Un	4	\$ 2.960	\$ 11.840	Sodimac
	Tee cementar 32 mm	Un	4	\$ 690	\$ 2.760	Sodimac
	Reducción larga m/h cem 32 x 20 mm Hoffens	Un	4	\$ 490	\$ 1.960	Easy
	Tubo PE de 20mm 20 m	Un	14	\$ 18.159	\$ 254.226	Aliexpress
	Tee 20mm PE	Un	66	\$ 133	\$ 8.778	Sercoriego
	Tapa gorro PVC cementar 20 mm	Un	66	\$ 90	\$ 5.940	Sodimac

Anexo 14: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector Lasana. No se considera el fertilizante (continuación)

Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
	Gotero autocompensado antidrenante 8 Litros/Hora EDE	Un	1056	\$ 146	\$ 154.176	Diplas
	Microtubo 4mm	Metro	528	\$ 118	\$ 62.304	Diplas
	Estacas de plástico negro de 11 mm para manguera de riego 100 un	Un	11	\$ 1.757	\$ 19.327	MercadoLibre
	Timer digital enchufable 2000 W manual y automático	Un	1	\$ 10.090	\$ 10.090	Sodimac
	Bolsas 10 Macetas Plantas Grandes 40x40 15 lt	Un	106	\$ 3.800	\$ 402.800	MercadoLibre
	Sistema venturi de 3/4 "	Un	1		\$ 23.111	Diplas
Total					\$ 7.256.003	

Anexo 15: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector PTAS El Peñón. No se considera el fertilizante. Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
					\$ 23.681.000	
Invernadero	Invernadero macro túnel 8x25 metros	Un	10	\$ 2.368.100	\$ 23.681.000	Agromarket
					\$ 5.920.000	
Germinación	Bandeja Almaciguera 50 Celdas	Un	110	\$ 1.500	\$ 165.000	MercadoLibre
	Bloque fibra de coco 70 litros (expandido)	Un	755	\$ 6.500	\$ 4.907.500	HumusChile
	Semillas tomate Runner F1 (1000 semillas)	Un	7,5	\$ 113.000	\$ 847.500	SemilleraSanAlfonso
					\$ 23.900	
Extra	Medidor de pH + Medidor de CE + Higrómetro Con Sonda	Un	1	\$ 23.900	\$ 23.900	MercadoLibre
Fertirriego			5		\$ 8.701.521	
	Estanque Vertical polietileno 5000 litros	Un	5	\$ 446.890	\$ 2.234.450	Sodimac
	Bomba para piscina IML AMERICA 1.00 HP 220V	Un	5	\$ 341.790	\$ 1.708.950	Ferreek

Anexo 15: Materiales y costos para la construcción de un sistema de fertirriego con sustrato en el sector PTAS El Peñón. No se considera el fertilizante. (continuación)
Fuente: Elaboración propia

Construcción	Ítem	Medida	Unidades	Precio	Total	Fuente
	Reducción de 63x50 mm	Un	5	\$ 1.530	\$ 7.650	Sodimac
	Tubería principal 50mm 6m	Un	25	\$ 1.640	\$ 41.000	Sodimac
	Codo PVC 50mm 90°	Un	5	\$ 401	\$ 2.005	Sodimac
	Tee PVC 50mm	Un	5	\$ 1.090	\$ 5.450	Sodimac
	Reducción de 50x32 mm	Un	10	\$ 790	\$ 7.900	Sodimac
	Tubería 32 mm x 6m	Un	20	\$ 2.960	\$ 59.200	Sodimac
	Tee cementar 32 mm	Un	20	\$ 690	\$ 13.800	Sodimac
	Reducción larga m/h cem 32 x 20 mm Hoffens	Un	20	\$ 490	\$ 9.800	Easy
	Tubo PE de 20mm 20 m	Un	70	\$ 18.159	\$ 1.271.130	Aliexpress
	Tee 20mm PE	Un	330	\$ 133	\$ 43.890	Sercoriego
	Tapa gorro PVC cementar 20 mm	Un	330	\$ 90	\$ 29.700	Sodimac
	Gotero autocompensado antidrenante 8 Litros/Hora EDE	Un	5280	\$ 146	\$ 770.880	Diplas
	Microtubo 4mm	Metro	2640	\$ 118	\$ 311.520	Diplas
	Estacas de plástico negro de 11 mm para manguera de riego 100 un	Un	55	\$ 1.757	\$ 96.635	MercadoLibre
	Timer digital enchufable 2000 W manual y automático	Un	5	\$ 10.090	\$ 50.450	Sodimac
	Bolsas 10 Macetas Plantas Grandes 40x40 15 lt	Un	530	\$ 3.800	\$ 2.014.000	MercadoLibre
	Sistema venturi de 3/4 "	Un	5		\$ 23.111	Diplas
Tratamiento					\$ 15.578.354	
	PTAS 15400 LTS. Sucursal La Serena (10.750 l/día)	Un	2	\$ 7.789.177	\$ 15.578.354	Bioplastic
				Total Sin PTAS	\$ 38.326.421	
				Total Con PTAS	\$ 53.904.775	

Anexo 16: Cálculo de pérdidas de carga para el peor tramo del sistema de fertirriego por goteo. Se considera para el cálculo solo 1 ramal, dado que el problema es simétrico, y el resultado final considera la pérdida por la manguera con goteros. Fuente: Elaboración propia.

	Matriz	Ramal 1	Ramal 2.1 (sector 1)	Ramal 2.2 (sector 2)	Ramal 2.3 (sector 3)
Caudal de Diseño [l/s]	2,347	1,1735	1,1735	0,7823	0,3912
Material	PVC	PVC	PVC	PVC	PE
Longitud [m]	5	14	14	14	28
Diámetro Nominal [mm]	50	32	32	32	20
Área [m2]	0,0020	0,0008	0,0008	0,0008	0,0003
Coefficiente de fricción	0,0180	0,0210	0,0210	0,0240	0,0270
Rugosidad relativa	3,00,E-05	4,69,E-05	4,69,E-05	4,69,E-05	7,50,E-05
Velocidad [m/s]	1,1953	1,4591	1,4591	0,9728	1,2451
Reynolds	5,91,E+04	4,62,E+04	4,62,E+04	3,08,E+04	2,46,E+04
Pérdida de carga friccional	0,1311	0,9970	0,9970	0,5064	2,9869
Pérdidas Singulares					
Tee Derivado K	1,8	-	1	-	-
Tee Línea K=	0,6	-	-	-	-
Reducciones K=	0,05	-	1	-	1
Codo 45° K=	0,42	-	-	-	-
codo 90° K=	0,9	-	-	-	2
Válvulas K=	1,5	-	-	-	1
Pérdida Singular por tramo	0,0000	0,2008	0,0000	0,0000	0,2647
Pérdidas totales por tramo	0,1311	1,1977	0,9970	0,5064	3,2516
Total, Peor tramo	6,0888				

Nota: Para el cálculo del coeficiente de Christiansen, se utiliza un $m = 0.75$, un largo de manguera de 2.64 metros, un espaciamento entre goteros de 0.17 y un coeficiente de fricción de 0.048. Se obtiene una pérdida de 0.005 metro.