
HUMEDALES DEPURADORES:

Una Solución Basada en la Naturaleza para el reúso de aguas residuales domésticas. Oportunidades y desafíos desde la evidencia científica.

Marchant, C., De la Vega, X., Vera-Puerto, I., Bravo, C.,
Belmonte, M., Urra, A., Tomasevic, J., Moris, G., Olave,
J., Herrera, L. & Rodríguez-Jorquera, I.

Este documento es resultado del **proyecto FSEQ210015: “Humedales depuradores para mitigar la escasez hídrica en Chile; Soluciones Basadas en la Naturaleza como herramienta de innovación para el tratamiento, la recuperación y la reutilización de aguas residuales”**. Financiado a través del fondo de investigación estratégica en sequía del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Cómo citar este documento:

Marchant, C., De la Vega, X., Vera-Puerto, I., Bravo, C., Belmonte, M., Urra, A., Tomasevic, J., Moris, G., Olave, J., Herrera, L. & Rodríguez-Jorquera, I. (2024). Humedales Depuradores: una Solución basada en la Naturaleza para el reúso de aguas residuales domésticas. Oportunidades y Desafíos desde la evidencia científica. Centro de Humedales Río Cruces Policy Brief N°1.

Disponible en: <https://cehum.org/investigacion/>

ISBN digital: 978-956-418-157-8

Diseño gráfico: Constanza Marchant Santiago

Fotografías: Equipo Proyecto ANID

Centro de Humedales Río Cruces
Cabo Blanco Alto s/n, Las Ánimas
Valdivia, Chile
www.cehum.org

El Centro de Humedales Río Cruces (CEHUM) de la Universidad Austral de Chile, es un centro de investigación, educación y conservación de humedales. Su misión incluye: “ser una institución de referencia nacional e internacional capaz de contribuir significativamente a la restauración y conservación de los humedales, aportando a su conocimiento y protección”.



**Atribución-NonComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional**



1.

INTRODUCCIÓN

La crisis climática global es considerada el mayor desafío en la historia de la humanidad. La ONU-Agua señaló en 2020 que, si la situación climática no cambia, el déficit hídrico global podría alcanzar el 40% en 2030, aunque estudios recientes apuntan que la crisis del agua puede ser más grave de lo previsto¹.

El 28 de julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente, a través de la Resolución 64/292, el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los demás derechos humanos. Posteriormente, la Agenda 2030 elaborada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015, establece un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. En específico, el ODS 6 apunta a “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, para lo cual se estableció como objetivo mejorar el tratamiento de las aguas residuales y aumentar la reutilización del agua, lo que debería fomentar, a su vez, la transición hacia una economía circular de esta² (Figura 1). En ese sentido, el Consejo

Mundial del Agua, señaló que más del 80% de las aguas servidas son descargadas al medio ambiente sin ser tratadas. Por ello es vital aumentar el tratamiento de ésta, dado que reduce el impacto en la salud medioambiental, animal y humana. La Evaluación de Desempeño Ambiental (2024) realizada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD)³, va en la misma línea, indicando el impacto de nuevas fuentes de suministros como es la reutilización de aguas residuales, profundizando además que la cobertura de las normas de descarga de aguas residuales sigue siendo irregular y obsoleta, así como también la falta de normas y reglamentos específicos para las fuentes de aguas residuales agrícolas.

En Chile, uno de los efectos más evidentes del cambio climático es la sequía, ya que afecta a una gran extensión del territorio nacional y se ha mantenido durante un amplio periodo de tiempo.

¹ ZANG, Yongqiang et al. Future global streamflow declines are probably more severe than previously estimated, *Nature Water* 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00030-7>

² UNESCO. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, 2017: Aguas Residuales: el recurso no explotado. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017.

³ OECD. Evaluación de Desempeño Ambiental de Chile. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/5bc65d36-en/index.html?itemId=/content/publication/5bc65d36-en#section-d1e1446-c664b4b7b2>



Figura 1. Economía circular del agua. Fuente: Rodríguez et al., 2020.

Históricamente, el país ha sufrido eventos de sequía, pero de no más de dos años de duración. Sin embargo, desde el año 2010 el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía, ha experimentado una importante disminución de las precipitaciones (cerca al 30%), coincidiendo con la década más cálida de los últimos 100 años. La magnitud temporal y espacial de este evento, que ha sido denominada como “megasequía”, y no tiene análogos en el registro histórico ni en las reconstrucciones climáticas del último milenio⁴.

El grave cuadro de sequía que ha afectado a parte importante del territorio nacional ha motivado la aplicación de decretos de emergencia hídrica desde el año 2008. Estos decretos “se dictan con el objeto de proveer determinadas herramientas a usuarios del agua y a la población en general para reducir al mínimo los daños derivados de la sequía, de esta forma da atribuciones a la Dirección General de Agua (DGA) para establecer criterios y delimitaciones para las autorizaciones

de extracción de aguas”. Así, a pesar de que el año 2023 presentaron lluvias normales para la zona centro-sur del país, se firmaron por parte del Ministerio de Obras Públicas (MOP) seis decretos de escasez hídrica, vigentes al 2024 para seis regiones del país⁵. Esta medida permite redistribuir las aguas de los cauces para priorizar el consumo humano y autorizar la extracción del agua, mientras dure la emergencia. Además, el Ministerio de Agricultura a marzo de 2024 ha declarado Emergencia Agrícola por déficit hídrico en 325 comunas a lo largo de Chile⁶, lo que permite la gestión de recursos por parte de este Ministerio y de medidas de apoyo, como la entrega de forraje o de alimento para abejas.

⁴ GARREAUD, René et al. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

⁵ Dirección General de Aguas. Planilla Decretos zonas de escasez hídrica (2008 - 2023) [Archivo Excel], Decretos declaración zona de escasez vigentes, 2023. <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursosohidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx>

⁶ MINISTERIO DE AGRICULTURA. Emergencia Agrícola por Déficit Hídrico, 2023. <https://www.minagri.gob.cl/emergencia-agricola-por-deficit-hidrico>

Textbox 1:

¿Qué son las aguas grises tratadas y las aguas residuales domésticas?

El término “aguas grises tratadas” hace referencia a las aguas residuales que han sido generadas por usos domésticos (agua de duchas, lavamanos, lavaplatos, lavadoras), excluyendo aquellas provenientes del WC que suelen denominarse “aguas negras”⁷. Las aguas grises tratadas pueden ser recicladas y reutilizadas para su uso en el riego de jardines, WC, y otros usos que no requieran de una calidad de agua potable. Dependiendo de las características fisicoquímicas de las aguas tratadas, sus usos pueden ampliarse incluso a ámbitos como la agricultura. Esto es relevante debido a que el cambio climático impacta directamente en la producción agrícola, afectando la calidad y cantidad de agua disponible para riego.

Se entiende como aguas residuales domésticas la totalidad de las aguas provenientes de una casa; es decir, la suma de las aguas grises tratadas y aguas negras.

En Chile, las experiencias de reciclado y reutilización de aguas grises tratadas en comunidades rurales son escasas. Dichas experiencias suelen ser proyectos particulares, no regulados, que han surgido como una respuesta a la situación de escasez del agua como iniciativas puntuales de personas que habitan espacios rurales.

⁷ LEIVA, Eduardo et al., en IRARRÁZAVAL, Ignacio et al. Propuestas para Chile. Concurso Políticas Públicas 2020, Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021.

1.1. ¿Qué estamos haciendo desde la ciencia?

El presente documento se elaboró a partir de los resultados del proyecto **“Humedales depuradores para mitigar la escasez hídrica en Chile; Soluciones basadas en la Naturaleza como herramienta de innovación para el tratamiento, la recuperación y la reutilización de aguas residuales”**, que desde el año 2022, ha sido ejecutado por el Centro de Humedales Río Cruces de la Universidad Austral de Chile, en conjunto con las Universidades Arturo Prat, Playa Ancha y Católica del Maule, además de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, en colaboración de la Cooperativa CAREP (Cooperativa de Aprendizaje, Restauración ecológica y Permacultura), el CEAZA (Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas) y la Red de Investigadores en Recursos Hídricos. Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, gracias al

fondo de investigación estratégica en sequía, convocatoria 2021, y busca demostrar que los humedales depuradores son eficientes y eficaces para obtener un agua tratada con calidad para ser reutilizada en la agricultura, principalmente en zonas rurales.

En 18 meses de ejecución del proyecto, un equipo interdisciplinario de investigadores/as desarrolló diversos experimentos, ensayos y mediciones con humedales construidos (depuradores) de flujo subsuperficial, de tipo horizontal (imágenes izquierda) o vertical (imágenes derecha), en cuatro regiones del país con diferentes condiciones geográficas y climáticas.

Textbox 2:

Innovaciones científicas centradas en el tratamiento de aguas han desarrollado técnicas de depuración mediante Soluciones basadas en la Naturaleza.

¿Qué son las Soluciones basadas en la Naturaleza?

Las soluciones basadas en la Naturaleza (desde ahora SbN) fueron definidas por el Comité Científico de Cambio Climático⁸ en el año 2021 como acciones para proteger, gestionar y restaurar de manera sostenible ecosistemas naturales o modificados. Estas SbN abordan desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria e hídrica o el riesgo de desastres de manera eficaz y adaptativa, al mismo tiempo que aportan al bienestar humano y proporcionan beneficios para la biodiversidad.

¿Qué son los humedales depuradores?

Los humedales depuradores (Figura 2) utilizan las propiedades que poseen los humedales naturales, como las plantas y microorganismos que habitan en ellos, lo que hacen la función de filtro natural para depurar aguas contaminadas. Estos sistemas consiguen bajar la cantidad y concentración de contaminantes característicos de las aguas residuales (metales, nutrientes, jabones, etc.), limpiando el agua para su potencial reutilización, por ejemplo, en actividades domésticas y para la agricultura.

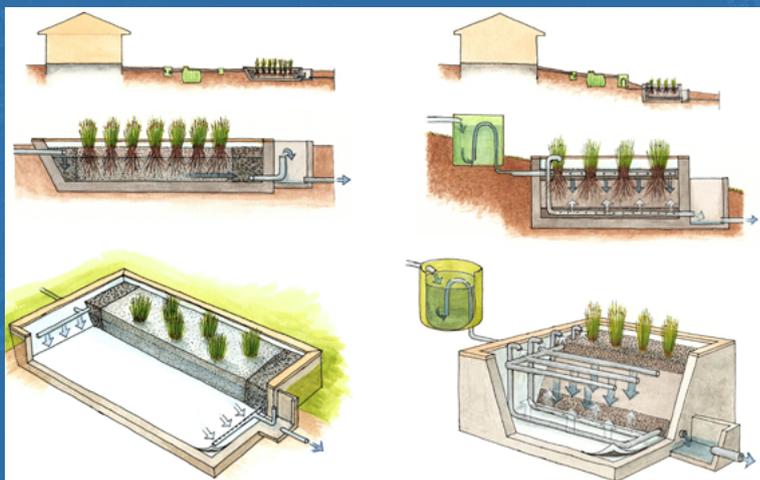


Fig. 2 Modelo esquemático de dos tipos de humedales depuradores, en la izquierda humedal de flujo horizontal, y en la derecha humedal de flujo vertical.
Fuente: Centro de Humedales Río Cruces.

⁸ MARQUET, Pablo et al. Soluciones basadas en la Naturaleza, Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5736938>

2.

¿DÓNDE TRABAJAMOS?





Iquique

- **Clima:** Árido
- **Escala:** laboratorio
- **Aguas:** residuales (negras + grises)
- **Plantas:** *Schoenoplectus californicus* y *Zantedeschia aethiopica*

Humedal subsuperficial de flujo vertical, ubicado en el laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) perteneciente a la Universidad Arturo Prat. Las aguas residuales se obtuvieron desde una planta de tratamiento de aguas residuales a gran escala (un tercio de la ciudad de Iquique), y se utilizaron para regar cultivos de alfalfa.



Valparaíso | Colliguay

- **Clima:** Mediterráneo
- **Escala:** piloto
- **Aguas:** grises
- **Plantas:** *Typha angustifolia*

Humedal subsuperficial de flujo vertical, las aguas residuales provienen de una vivienda del sector rural de Colliguay comuna de Quilpué donde viven 4 personas. El agua tratada está disponible para el riego de árboles frutales (cítricos, nísperos).



Curicó

- **Clima:** Mediterráneo
- **Escala:** piloto
- **Aguas:** residuales domésticas (negras + grises)
- **Plantas:** *Zantedeschia aethiopica*

1. Humedal Vertical

Humedal subsuperficial de flujo vertical abastecido con aguas servidas

provenientes de la planta de tratamiento de un servicio sanitario rural del sector La Obra, comuna de Curicó.

2. Humedal Horizontal

Humedal subsuperficial de flujo horizontal abastecido con aguas servidas provenientes de la planta de tratamiento de un servicio sanitario rural del sector La Obra, comuna de Curicó.



Valdivia | Los Pellines | Cayumapu

- **Clima:** Húmedo templado/ templado lluvioso
- **Escala:** real
- **Aguas:** residuales domésticas (negras + grises) o solo grises
- **Plantas:** *Juncus procerus*

1. CEHUM

Aguas: servidas (negras + grises)

Humedal subsuperficial vertical, abastecido con agua servida para un máximo de 175 personas (visitantes y funcionarios). Esta agua es desinfectada y reingresada a los wc. Además, el agua tratada es utilizada para el riego de un jardín etnobotánico.

2. Los Pellines

Aguas: grises

Humedal subsuperficial vertical, abastecido con aguas grises tratadas

del centro demostrativo CAREP. Dimensionado para un total de 30 personas entre visitantes y trabajadores/as.

El agua que sale del humedal, es desinfectada y utilizada para regar un huerto de frambuesas, murta, grosellas y zarzaparrilla.

3. Cayumapu

Aguas: grises

Humedal subsuperficial horizontal, abastecido con aguas grises tratadas de una vivienda de 4 personas.

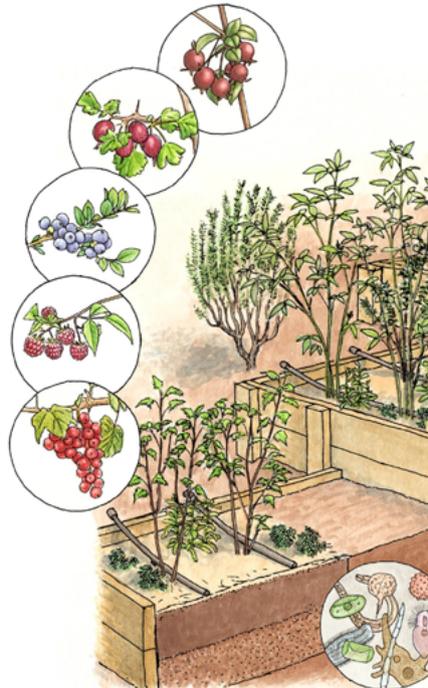
El agua que sale del humedal es infiltrada al suelo para no contaminar las napas de agua.

3.

**EXPERIENCIA DE
LOS HUMEDALES
DEPURADORES PARA
EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES,
COMO FUENTE DE
AGUA PARA LA
AGRICULTURA:
CASO DE ESTUDIO**

En Chile, la Norma Chilena (NCh) 1333 de 1978 establece la calidad del agua para diferentes usos de acuerdo a requerimientos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos. Estos criterios tienen por objeto proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos como agua para consumo humano, agua para la bebida de animales, riego, vida acuática, recreación y estética, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen. Es importante destacar que las normas chilenas no son de obligatorio cumplimiento y se usan de manera referencial. Es relevante mencionar que la Norma Chilena (NCh) 3456 de 2021 considera específicamente el origen residual del agua para su reuso. No obstante, debido a la amplia práctica de utilizar la NCh1333, esta fue la norma elegida para este proyecto.

Si bien esta norma no es específica para la reutilización de aguas residuales, en esta investigación se ha utilizado como referencia para medir la calidad del agua depurada. Así, la norma establece concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego, donde los humedales depuradores mejoran sustancialmente la calidad. Por ejemplo, en este estudio se midieron las concentraciones de hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn), tanto a la entrada como a la salida de los humedales que depuraron aguas grises, como aguas residuales domésticas, encontrando una eficiencia de depuración entre el 45 y 98%. Es importante resaltar que se observó una reducción en los humedales de Valdivia, de hasta un 90% de arsénico (As).



3.1 Efectividad en la reducción (depuración) de nutrientes, metales pesados y parámetros biológicos en Humedales Depuradores

A partir de los resultados obtenidos por cada humedal depurador podemos concluir que, en general, estos sistemas fueron eficientes para la remoción de nutrientes como el nitrógeno (en forma de amonio) con reducciones mayores al 50%, el fósforo (fosfato) con reducciones hasta de un 99% de este elemento. En el caso de los parámetros como los sólidos suspendidos Totales (TSS), pudimos determinar que los Humedales Depuradores (HD) removieron entre el 72% al 97,3%. Para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), obtuvimos reducciones que van del 60% al 98%, y para el caso de DQO, entre 67% al 91%. Para el caso de los metales, algunas de las reducciones observadas en toda la gradiente de trabajo (desde la Región de Tarapacá a la Región de los Ríos) fueron de 42% a 99%. Para el caso del Cobre se observó depuración en 4 de los 7 humedales en el rango de 23-91%. Del mismo modo, el aluminio disminuyó en 80%

en cuatro humedales. Finalmente, compuestos altamente tóxicos como el Arsénico también fueron depurados en todos los humedales medidos.

Para parámetros bacteriológicos relevantes como los coliformes totales se observó reducciones en todos los humedales donde se midió. Los resultados varían según tipo de agua depurada siendo lógicamente menores las reducciones en aguas negras en comparación con las reducciones en aguas grises tratadas donde el afluente entrega menos cantidad de coliformes. En general, se observó que la clave en términos de resultados bacteriológicos está en el correcto uso de cloro (cloración) posterior a la depuración, lo que no siempre se logra con efectividad, siendo un factor relevante a analizar y mejorar en futuras instalaciones de HD.

3.2 Contaminantes Emergentes

Durante el periodo también se determinaron otras sustancias químicas que alteran la calidad del agua, como son los denominados **“contaminantes emergentes”**. Estos corresponden a sustancias químicas o compuestos poco conocidos (como algunos fármacos, hormonas o productos de cuidado y de higiene personal), que se encuentran en bajas concentraciones en comparación con otros contaminantes más conocidos (como el nitrógeno o la materia orgánica). Los contaminantes emergentes pueden estar presentes en aguas residuales, desconociéndose su interacción en los ecosistemas naturales una vez vertidos a los cuerpos de agua. Así, estos contaminantes no se encuentran regulados, y su presencia o acumulación en los ecosistemas podrían suponer un riesgo tanto al medio ambiente como a la salud humana. Para este estudio se midieron dos compuestos emergentes dependiendo del tipo de agua residual a evaluar: cafeína para el caso de las aguas servidas, y surfactantes aniónicos (tensoactivos) para las aguas grises. La cafeína, es un compuesto presente tanto en el café como en algunas bebidas gaseosas y energéticas, consumidas y excretadas por el ser humano, y cuya presencia en las aguas residuales a determinadas concentraciones

puede provocar efectos negativos en especies de animales al ser descargadas a los cuerpos de agua. Los tensoactivos en cambio, están presentes en los detergentes y son ampliamente utilizados en la cocina como en la lavadora. Son parte de los constituyentes de los lavalozas, lavarropas y jabones debido a su capacidad de disolver las grasas, por lo que es un contaminante emergente comúnmente presente en las aguas grises. El comportamiento de los humedales depuradores para eliminar estos compuestos emergentes, demostraron que en los sitios de estudio en donde se evaluaron las aguas servidas, los humedales lograron depurar la cafeína en un 90%; mientras que, en el caso de los humedales depuradores que trataron aguas grises, lograron depurar los surfactantes aniónicos entre un 70% y un 90%.

En nuestro estudio, los contaminantes emergentes fueron altamente depurados al pasar por los humedales depuradores. La figura 3 muestra los resultados de depuración de **(a)** cafeína en dos condiciones climáticas muy disímiles como son Iquique en la región de Tarapacá (clima desértico) y Valdivia en la Región de los Ríos (clima oceánico templado) y **(b)** depuración de surfactantes aniónicos en dos sistemas diferentes de humedales depurados vertical subsuperficial (CAREP) en Valdivia, Región de los Ríos y Horizontal subsuperficial (Cayumapu), en los región de Los Ríos.

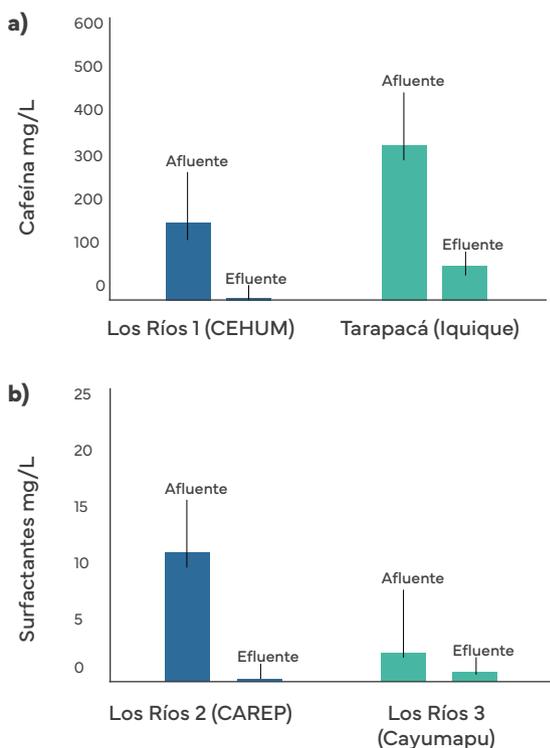


Fig 3. Reducción de **(a)** cafeína y **(b)** surfactantes en distintos humedales depuradores del proyecto: Los Ríos 1 (CEHUM), Tarapacá (IQUIQUE), Los Ríos 2 (CAREP) y Los Ríos 3 (CAYUMAPU).

3.3 Impacto de la reutilización de efluentes de humedales depuradores en la agricultura (producción de forrajes, hortalizas y frutales)

Uno de los resultados más relevantes obtenidos en este proyecto fue en la producción de alfalfa. En la región de Tarapacá, se obtuvo mayor producción de biomasa fresca y seca de las plantas de alfalfa del tipo Alta Sierra y Baldrich 350 (equivalente a 2,72 veces) regados con el efluente de un humedal vertical (Figura 4). La mayor producción de biomasa se relaciona además con un mayor índice de clorofila, mostrando que las variedades regadas con agua tratada presentan 2,65 veces mayor superficie que las plantas control, las que se regaron con agua potable.

Respecto a las otras regiones del país, donde se regó con aguas de efluente de HD los cultivos de: naranja y níspero (en la región de Valparaíso), lechuga hidropónica (en la Región del Maule) y zarparrilla, frambuesas y murta en el caso de la región de los Ríos, nos permiten establecer una leve tendencia al alza en la concentración de hierro en la fruta regada con agua residual tratada en comparación a la fruta regada exclusivamente con agua de pozo, para el caso de la región de los Ríos, pero sin significar una concentración contaminante. En el caso de la región del Maule, las lechugas regadas en Talca, la tendencia fue todo



Fig 4. Cultivo de alfalfa en la región de Tarapacá, se utiliza riego con efluente del humedal depurador horizontal artificial.

lo contrario; es decir, la lechuga (blanco) posee mayor concentración de hierro en comparación con la lechuga regada con agua residual tratada. Para el caso del Zinc (Zn) en los tejidos frutales los resultados demuestran que tiende a encontrarse levemente una menor concentración en los frutos regados con agua residual tratada, en comparación a las frutas que se regaron con agua de riego. Esto se puede explicar por la depuración de Zn efectiva en los humedales depuradores en estudio, con un rango de depuración de 62 a 99,5%.

Para determinar si existen diferencias significativas en concentraciones de elementos contaminantes entre regar con aguas residuales tratadas y agua potable, realizamos una comparación estadística (ANOVA con nivel de confianza 95%), donde incluimos los resultados químicos de la calidad de tejido frutal (Hierro, Zinc, Manganeso) y suelo (Hierro, Zinc, Manganeso, Cobre, Plomo, Níquel, Magnesio y Calcio). Los resultados estadísticos nos permiten concluir que no existen diferencias significativas entre regar con agua potable y regar con agua tratada, ya que no se observa un aumento en los niveles de metales en el tejido frutal, ni tampoco impacta a la calidad del suelo.

Podemos concluir, entonces, que las aguas residuales tratadas (vía humedal depurador), carecen de toxicidad, como comúnmente se ha pensado y que en términos de niveles de contaminación en frutos no hay diferencias entre regar con agua reutilizada de HD y regar con agua potable.



4.

MARCO NORMATIVO Y LEGISLATIVO EN CHILE PARA EL REÚSO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS A TRAVÉS DE HUMEDALES DEPURADORES



Los humedales depuradores están sujetos a la normativa aplicable a los sistemas de tratamiento de aguas servidas, entre eso, se deben presentar al servicio de salud respectivo una memoria de cálculo de las proyecciones de caudales a tratar, las dimensiones adecuadas y el flujo hidráulico de las aguas tratadas. Por otro lado, en la legislación chilena de los últimos años, se destaca y promueve la utilización de SbN; tal es el caso de las siguientes leyes donde se fomenta su uso: Ley Marco de Cambio Climático 21.455/2022, Reforma del Código de Aguas 21.435/2022. Además, en la Ley de Presupuestos para el sector público 2023 y particularmente la partida correspondiente al Ministerio de Agricultura (Comisión Nacional de Riego - glosa 6).

Lo anterior da cuenta cómo **las SbN son consideradas en la legislación como herramientas de mitigación efectivas ante los efectos de la sequía y un mecanismo para la adaptación al cambio climático.** En la misma línea, se está fomentando en la legislación chilena el uso de SbN como una tecnología climática, verde o ecológica, en particular en los instrumentos nacionales de fomento al riego.

Este estudio pionero permite, a través de la evidencia científica, demostrar que las SbN como los humedales depuradores, **mejoran la calidad del agua en todos los contextos climáticos del estudio** y que además esta agua recuperada es susceptible de ser reutilizada. Todo esto, refuerza el potencial de los humedales depuradores como una herramienta efectiva para el reúso de las aguas tratadas y que contribuye a mitigar los efectos de la sequía y la adaptación a la crisis climática y proporcionar un uso solidario del agua.

Por otro lado, con la entrada en vigencia de la Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales en 2020, se busca garantizar el abastecimiento de agua potable y saneamiento para los habitantes de espacios rurales. Además, se reconoce a las organizaciones sociales como los operadores y administradores de los servicios sanitarios en su territorio, mientras que establece al Estado como proveedor de la infraestructura. En cuanto al traspaso de atribuciones a las comunidades rurales, serán los comités y cooperativas de agua potable rural existentes quienes, en conformidad con la nueva Ley, se encargarán del saneamiento y la construcción de la red de alcantarillado. **Tomando en cuenta lo señalado, es importante considerar que, para las aguas grises de los entornos rurales, existe la ley 21.075, la que explicita la posibilidad de reutilizar estas aguas para riego con fines agrícolas. Recientemente en 2024, fue promulgado el decreto 40, que establece las condiciones sanitarias mínimas para la reutilización de aguas grises tratadas, lo que incluye, entre otras cosas, la fijación de estándares de calidad para el riego agrícola.**

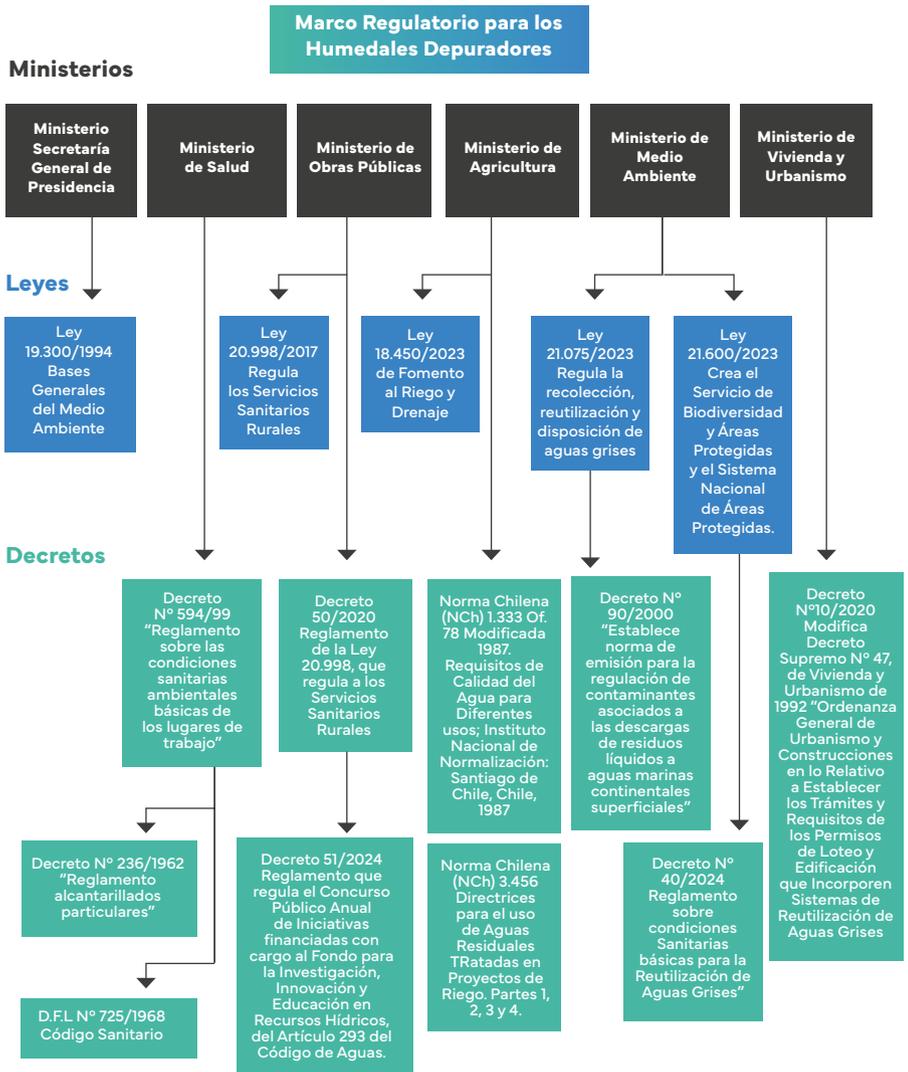


Fig 5. Mapa institucional, legislativo y normativo para los humedales depuradores en Chile

5.

RECOMENDACIONES Y DESAFÍOS FINALES



Para afrontar esta crisis hídrica se requiere de una gobernanza, gestión adecuada a la realidad territorial y climática, oportuna, colaborativa y coordinada con todos los actores, que incluya acciones a corto, mediano y largo plazo. Esto implica que a nivel nacional se requiera de una unidad o institución gubernamental con capacidad de articular la gestión. Además, se requiere generar políticas públicas e instrumentos vinculados a todo lo relacionado con el agua, incluyendo fuentes convencionales como no convencionales de abastecimiento (por ejemplo: aguas residuales), así como en el saneamiento, y conservación de protección de fuentes de agua tratadas. En este sentido, el informe final de la Mesa Nacional del Agua (2022), correspondiente a una instancia de carácter público-privado entregó recomendaciones y lineamientos para mejorar la eficiencia hídrica, y establecer los temas centrales que debería contener una política hídrica nacional a largo plazo.

A partir de los resultados científicos y de la experiencia adquirida en el presente estudio, cuyo objetivo es coherente con lo planteado anteriormente, se proponen las siguientes recomendaciones y consideraciones:

5.1 Impulsar normas por macrozona

Recientemente en 2022 se creó el Comité Interministerial de Transición Hídrica Justa, el cual ha generado una serie de propuestas para el diseño e implementación de mecanismos efectivos de gobernanza hídrica. Como es sabido, muchos de los problemas de gestión hídrica, los que se caracterizan por ser complejos, interconectados, multisectoriales y multi-regionales, están influenciados por una gestión inadecuada. Por ello, diversos grupos de expertos como el Centro de Derecho y Gestión de Aguas UC (2023) y la OECD (2024) han señalado la necesidad de descentralizar las decisiones hídricas en materias de planificación; esto para dotar de mayor sentido y legitimidad a las decisiones que los actores locales



tomen, promoviendo una gobernanza local y participativa. Para ello, es necesario promover la existencia de entidades de gobernanza hídrica, las cuales podrían velar para que la disponibilidad de agua en cantidad y calidad para consumo humano y saneamiento sea pertinente con los usos territoriales, la conservación de los ecosistemas y la producción. En ese sentido es necesario, **promover mecanismos que permitan mantener o restablecer los equilibrios entre disponibilidad y aprovechamiento del agua, por ejemplo, a través del impulso a SbN de I+D+i como son los humedales depuradores y la obtención de agua desde una fuente no convencional como son las aguas residuales, ampliando la matriz de generación de recurso hídrico para distintos usos, como por ejemplo, para la agricultura.**

5.2 Incorporación de aspectos ambientales en la Ley 20.998



Mejorar la sostenibilidad de los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) mediante acciones pertinentes a nivel territorial en el contexto de escasez hídrica y adaptación al cambio climático es indispensable. En este sentido, **se recomienda dotar a la Ley 20998, que regula los SSR, de consideraciones ambientales, específicamente en el saneamiento y reutilización de aguas residuales** a través de humedales depuradores. Aunque la ley permite el uso de humedales depuradores, definidos como “soluciones descentralizadas de saneamiento”, no existen actualmente acciones que fomenten su implementación desde los SSR.

La reutilización de aguas residuales es especialmente relevante en contextos de cambio climático y escasez hídrica, ya que mejora la calidad y cantidad de agua disponible para riego, beneficiando tanto la producción agrícola como el bienestar de las comunidades rurales. Es crucial reconocer en la legislación la contribución de los ecosistemas terrestres y los servicios ecosistémicos, promoviendo prácticas sostenibles que aseguren la provisión continua de recursos hídricos.

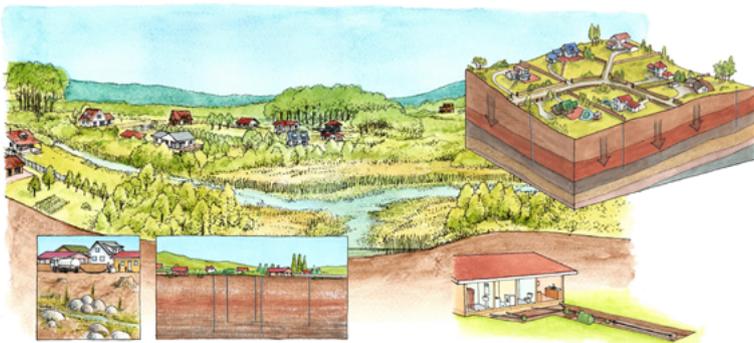
5.3 Articulación de políticas públicas para la sostenibilidad hídrica en comunidades rurales

El país debe avanzar en formas de reutilizar de manera segura las aguas residuales tratadas como una nueva fuente de riego considerando para ello los principios de la economía circular. Según la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), la responsabilidad de las autorizaciones y permisos está relegada en su totalidad a las empresas del rubro, las cuales actualmente no cuentan con incentivos económicos para promover la reutilización de las aguas residuales tratadas, salvo el apoyo de instituciones gubernamentales que por ley se dediquen a promover dicha reutilización (Comisión Nacional de Riego, CNR).

Esta situación muestra la necesidad de un marco institucional robusto **para fomentar y apoyar la recuperación de aguas residuales recicladas en proyectos de reutilización, a través del mecanismo Pago de Servicios Ecosistémicos que crea la Ley 21.600 crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Junto a este marco es crucial articular los diferentes instrumentos de política pública vinculados con los humedales depuradores como son; la Ley 20.998, la Ley de Riego 18.450 y el Programa Sistemas Sanitarios Sustentables para Microempresas Turísticas de Zonas Rurales mediante la implementación de humedales depuradores.** La Ley 20.998 regula los Servicios Sanitarios Rurales (SSR), pero no incluye explícitamente la sostenibilidad ni el reconocimiento de los ecosistemas como proveedores de servicios hídricos. Incorporar humedales depuradores como soluciones descentralizadas de saneamiento puede mejorar la provisión de agua potable y el tratamiento de aguas residuales, abordando la escasez hídrica y los impactos del cambio climático.

La Ley de Riego 18.450, que fomenta la inversión privada en obras de riego y drenaje, ya ha integrado objetivos ambientales, como la reutilización de aguas residuales y la conservación de la biodiversidad. Este enfoque debe ser alineado con la Ley 20.998 y el Programa de Sistemas Sanitarios Sustentables para asegurar una gestión coherente y sostenible del agua. La articulación de estos instrumentos permite una mejor utilización de los recursos hídricos y refuerza la importancia de prácticas sostenibles en sectores críticos como la agricultura y el turismo.

El Programa Sistemas Sanitarios Sustentables para Microempresas Turísticas de Zonas Rurales destaca la necesidad de infraestructura adecuada para abordar la crisis hídrica y mejorar la experiencia turística sin comprometer el medio ambiente. La integración de humedales depuradores en este programa no solo mejoraría la gestión del agua sino también promovería la resiliencia de las comunidades rurales.



Esta articulación de políticas públicas, con un enfoque en el capital natural, es fundamental para asegurar un desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de los habitantes de zonas rurales.

La implementación de políticas interconectadas es esencial para alcanzar un desarrollo sostenible, mejorando la calidad de vida en las zonas rurales y asegurando una gestión hídrica eficiente y sostenible a largo plazo. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), como los humedales depuradores, deben formar parte de la política pública vinculada a la circularidad del agua y a un enfoque ecosistémico y sostenible para los sistemas de agua potable rural y de riego.

5.4 Fortalecer la investigación y la innovación en la reutilización de aguas residuales

Es fundamental desarrollar un marco institucional robusto que fomente y apoye la recuperación de aguas residuales recicladas. Este marco debe incluir estudios nacionales liderados por universidades y centros de investigación, así como incentivos económicos del gobierno para considerar las aguas residuales tratadas como nuevas fuentes hídricas. Este enfoque se alinea con la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, que buscan prosperidad económica, calidad ambiental e impacto positivo en la igualdad social.

La Reforma al Código del Agua que crea el “Fondo para la Investigación, Innovación y Educación en Recursos Hídricos” promueve diez líneas de trabajo para la implementación, investigación, innovación y educación en la gestión sostenible del agua. Estas líneas, todas vinculadas desde diferentes perspectivas a los humedales depuradores, incluyen la gestión de aguas en ecosistemas prioritarios y la reutilización de aguas, debiendo integrarse con otros instrumentos para potenciar el uso de humedales depuradores. Esta integración asegura una gestión coherente y sostenible del agua, promoviendo la resiliencia de las comunidades rurales frente al cambio climático.

5.5 Socializar las tecnologías y evaluar la percepción social sobre la adopción de este tipo de prácticas

Finalmente, para abordar la realidad del reúso y reciclaje de aguas grises tratadas en zonas rurales de Chile es necesario explorar experiencias científicas y legales internacionales sobre este asunto, de manera de evaluar potenciales propuestas de mejora para la implementación y aplicación de la Ley N° 21.075. Del mismo modo, un análisis de la normativa y marco legal nacional permitirá evaluar alternativas y modificaciones legales que propicien mejoras en la norma para lograr una aplicación más transversal de la reutilización de aguas grises tratadas. En línea con lo anterior, un diagnóstico claro y preciso sobre las necesidades, realidades locales, problemáticas y brechas de las comunidades rurales en torno al reúso de agua tratada resulta clave para establecer propuestas de políticas públicas que lleguen a perfeccionar la ley. En este sentido, para una implementación y aplicación efectiva serán fundamentales las especificaciones y lineamientos establecidos en el reglamento, para que este pueda abarcar transversalmente las diferentes realidades de las comunidades urbanas y particularmente las complejidades de aplicación que presentan las comunidades rurales. Asimismo, con respecto a este público objetivo, es necesario desarrollar alianzas estratégicas con INDAP para que, a través del extensionismo rural, sea posible masificar estas tecnologías y que sean conocidas por potenciales usuarios.

TEXTBOX 3: MENSAJES CLAVE PARA TOMADORES DE DECISIONES

LOS HUMEDALES DEPURADORES
son Soluciones
basadas en la Naturaleza

que permiten tratar las aguas residuales, generando a la vez beneficios como: espacio de áreas verdes, refugio para fauna, espacios de desarrollo de plantas nativas, entre otros.

EL COSTO ESTIMADO DEL DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE LOS HUMEDALES
DEPURADORES APROXIMADO ES DE

25UF/m²

requiriéndose entre 1,2 a 4,0 m²
por persona.

AGUA QUE ES DEPURADA SE REUTILIZA SIEMPRE EN

mejores condiciones que las iniciales.

Todos los ensayos realizados en este proyecto muestran resultados favorables: el agua que es depurada se reutiliza siempre en mejores condiciones que las iniciales. **La calidad del agua mejora a todo evento. La reutilización de aguas es una solución integral a una problemática que requiere soluciones concretas en el corto y mediano plazo.**

LA NECESIDAD DE INTEGRAR A LOS

Servicios Sanitarios Rurales en el reúso de aguas residuales tratadoras

en una alternativa viable con la Ley N°20.998 aprobada. Para esto es indispensable trabajar con los Gobiernos Regionales y realizar pilotos en las regiones que permitan un aprendizaje basado en el territorio. Asimismo, el monitoreo de aguas debe seguir patrones más continuos de periodicidad para contar con mejores datos. Sugerimos que este monitoreo se realice de manera estacional, es decir 4 veces al año.

Chile no cuenta con medición ni menos norma para contaminantes emergentes.

Existen desafíos regulatorios que deben ser abordados en el corto plazo: hoy Chile no cuenta con medición ni menos norma para contaminantes emergentes, tales como cafeína, antibióticos y surfactantes. Es vital incorporar estos parámetros a las normativas de regulación vigentes.

UN DESAFÍO CLAVE ES
**mejorar las normativas
y monitoreo**
de las aguas superficiales
continentales

Finalmente, y no menos relevante, un desafío clave es mejorar las normativas y monitoreo de las aguas superficiales continentales, las que son utilizadas ampliamente para regadío en todo el territorio nacional.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

El equipo de investigación declara no tener conflictos de interés para el desarrollo de las recomendaciones planteadas en este documento.



ANEXO 1

Textbox 4: Parámetros (rangos y promedios) analizados en las muestras de los humedales depuradores

CATEGORÍAS	HUMEDAL PARÁMETRO MEDIDO	AGUA PARA RIEGO: MÁXIMO PERMITIDO (SEGÚN NCH 1333/1978)	AGUAS RESIDUALES TRATADAS PARA RIEGO: VALOR MÁXIMO EN UNA SOLA MEDICIÓN (SEGÚN NCH 3456/1:2021)	DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS A CUERPOS DE AGUAS FLUVIALES. LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO (SEGÚN DS 90/2001)	IOQUIQUE	VALPARAÍSO	TALCA /CURICÓ	VALDIVIA	
PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS	pH	6,5 a 8,3**		6,5 a 8,8	6,87	7,25	6,96	6,89	
	Temperatura máxima			35	13,5	13,43	15	14,47	
	Conductividad	750 < c < 1500	dS/m 05 -8,0****		1,051	768	972	1,055	
	Oxígeno disuelto (OD)	Mínimo 5 mg/L			35,5	7,55	5,29	12,37	
METALES	Hierro (Fe)	5 mg/l	5 mg/l	5, mg/l	0,082	0,1	0,19	2,22	
	Aluminio (Al)	5 mg/l	12,5 mg/l	5, mg/l	1,156	0,056	0,488	0,55	
	Cobre (Cu)	2,2 mg/l	0,5 mg/l	1 mg/l	<0,02	0,02	0,05	0,02	
	Zinc (Zn)	2 mg/l	5 mg/l	3 mg/l	<0,02	0,062	0,02	0,023	
NUTRIENTES/ MICRO NUTRIENTES	Nitrógeno (N)		35 mg/l	50 mg/l (NKT)	27,6	19,43	34,36	42,3	
	Nitrato				82,9	9,34	44,61	89,47	
	Fósforo total		7 mg/l	10mg/l	2,74	0,63	1,83	0,88	
	Fosfato				8,1	3,07	5,63	2,45	
	AMONIO (NH4+)	mg/L	30		1,75	0,14	12,34	14,63	
EMERGENTES	Cafeína	mg/L			0,42	NA *****	NA *****	0	
	Sulfactantes aniónicos	mg/L			0,04	0,06	0,08	0,69	
MATERIA ORGÁNICA Y OTROS	Sólidos disueltos totales (TDS)	250 mg/L			9,85	28,3	29,64	14,73	
	Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L O2		35* mg O2/L	-	8,97	34	11,9	
	Demanda química de oxígeno (DQO)- Total	mg/L			61,6	144,5	95,83	70,55	
	Demanda química de oxígeno (DQO) disuelta	mg/L			30,02	45	56,16	53,22	
	E coli	NMP/100 ml			NMP/100 ml 1000	-	-	49.258 (sin cloración)	13.332 (sin cloración)
	Coliformes fecales	Debe ser menor o igual a 1000 coliformes fecales/100 ml			NMP/100 ml 1000	-	<1,8 (sin cloración)	-	-

* Se presenta este Decreto Supremo 90/2001 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales.

**Excepto si las condiciones naturales de las aguas muestren valores diferentes, pero en ningún caso menor a 5,0 ó mayor de 9,0.

***Decreto Supremo 90/2001 para los residuos líquidos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas domésticas, no se considerará el contenido de algas.

**** Nch 3456/1:2021 conductividad eléctrica: Muy baja tolerancia = 0,5 dS/m; Baja tolerancia = 1,0 dS/m; Tolerancia moderada = 2,0 dS/m; Alta tolerancia = 4,0 dS/m y Muy alta tolerancia = 8,0 dS/m.

***** NA: No analizado





CENTRO DE HUMEDALES RÍO CRUCES

