



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



**OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE A PARTIR DE RECURSOS
HÍDRICOS NO CONVENCIONALES: AGUA DE MAR, AGUAS
SERVIDAS TRATADAS, HUMEDAD DEL AIRE Y NIEBLA**

José Luis Campos / Zeinab Ameneh Morhell / Dafne Crutchik / Jacques Dumais
Javiera Toledo / Ricardo Oyarzún / David Jeison

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Obtención de agua potable a partir de recursos hídricos no convencionales: agua de mar, aguas servidas tratadas, humedad del aire y niebla.

José Luis Campos, Zeinab Ameneh Morhell, Dafne Crutchik,

Jacques Dumais, Javiera Toledo, Ricardo Oyarzún y David Jeison.

Diciembre 2024.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl

Este documento debe citarse como:

Campos, J., Morhell, Z., Crutchik, D., Dumais, J., Toledo, J. Oyarzún, R., Jeison, D. 2024. Obtención de agua potable a partir de recursos hídricos no convencionales: agua de mar, aguas servidas tratadas, humedad del aire y niebla.

Serie Comunicacional CRHIAM, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (ANID/FONDAP/1523A0001). ISSN 0718-6460 (versión impresa),

ISSN 0719-3009 (versión online), No. 82, 35pp.

Disponible en: <https://www.crhiam.cl/publicaciones/series-comunicacionales/>



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



**OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE A PARTIR DE RECURSOS
HÍDRICOS NO CONVENCIONALES: AGUA DE MAR, AGUAS
SERVIDAS TRATADAS, HUMEDAD DEL AIRE Y NIEBLA**

José Luis Campos / Zeinab Ameneh Morhell / Dafne Crutchik / Jacques Dumais
Javiera Toledo / Ricardo Oyarzún / David Jeison

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



José Luis Campos

Químico Industrial,
Universidad Santiago de Compostela.
Doctor en Ciencias Químicas,
Universidad Santiago de Compostela.
Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez.
Investigador Asociado CRHIAM.



Zeinab Ameneh Morhell

Ingeniera Química.
Mg. en Ciencias de la Ingeniería
con mención en Energía y Medioambiente,
Universidad Adolfo Ibáñez.
Ingeniera de Procesos en GRT Consultores - Chile.



Dafne Crutchik

Doctora en Ingeniería Química y Ambiental,
Universidad de Santiago de Compostela.
Profesora Asociada,
Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez.



Jacques Dumais

PhD en Ciencias Biológicas,
Stanford University, Estados Unidos.
Profesor Titular,
Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez.



Javiera Toledo

Ingeniero Civil Bioquímico,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
Magíster en Ciencias de la Ingeniería,
mención Ingeniería Bioquímica.
PhD en Biotecnología y Microbiología,
Universidad de Montpellier, Francia.
Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez.



Ricardo Oyarzún

Ingeniero Agrónomo,
Universidad de La Serena.
Magíster en Ciencias de la Ingeniería,
Universidad de Concepción.
PhD Engineering Science,
Washington State University, USA.
Departamento Ingeniería de Minas,
Universidad de La Serena.
Investigador Adjunto CRHIAM.



David Jeison

Ingeniero Civil Bioquímico,
Pontificia Univ. Católica de Valparaíso.
Magíster en Ciencias de la Ingeniería,
mención Ingeniería Bioquímica.
Doctor en Ciencias Ambientales,
Universidad de Wageningen, Países Bajos.
Escuela de Ingeniería Bioquímica, Facultad de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
Investigador Asociado CRHIAM.

RESUMEN

Las fuentes de recursos hídricos no convencionales, como el agua de mar y las aguas servidas tratadas, ofrecen soluciones sostenibles frente a la escasez hídrica. La desalación de agua de mar, ampliamente utilizada, es efectiva pero energéticamente intensiva, mientras que tecnologías como la destilación solar, con gran potencial en el norte de Chile debido a su alta radiación solar, podrían ser alternativas más competitivas si se actualizan con sistemas modernos de concentración solar. Por su parte, las aguas servidas tratadas presentan ventajas en áreas urbanas por su proximidad al lugar de uso, aunque su regeneración puede impactar los ecosistemas locales y enfrenta barreras legales relacionadas con su propiedad y comercialización. La percepción pública también es un desafío, pero experiencias como las de Singapur demuestran que la aceptación puede lograrse con campañas de concienciación.

Otros recursos, como la humedad del aire y la niebla, son alternativas viables en áreas rurales e interiores. La captación de humedad mediante sistemas con energía fotovoltaica podría ofrecer costos competitivos frente a métodos tradicionales como el transporte en camiones cisterna, aunque requiere inversiones iniciales significativas. Los atrapanieblas, por su parte, son útiles en regiones costeras específicas, pero su eficacia depende de las condiciones climáticas y su costo sigue siendo elevado. Cada tecnología tiene nichos específicos de aplicación, y su combinación podría ser clave para abordar la crisis hídrica en Chile, tanto en áreas urbanas con infraestructura existente como en zonas rurales con necesidades particulares.



INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los compuestos más abundante presente en la Tierra, estimándose su cantidad total en alrededor de $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ (Baker *et al.*, 2016). El 97,5% del agua del planeta es agua de mar, mientras que el 2,5% restante (es decir, $3,5 \cdot 10^7 \text{ km}^3$) es agua dulce (Figura 1). De ésta, un 30% corresponde a aguas subterráneas y el 1% son aguas superficiales de las cuales los lagos y ríos suponen un 66% y 2%, respectivamente. Por lo tanto, tan sólo el 0,7% de la cantidad total de agua disponible se encuentra en lagos, ríos y acuíferos de donde el ser humano la extrae de forma convencional para diversos usos.

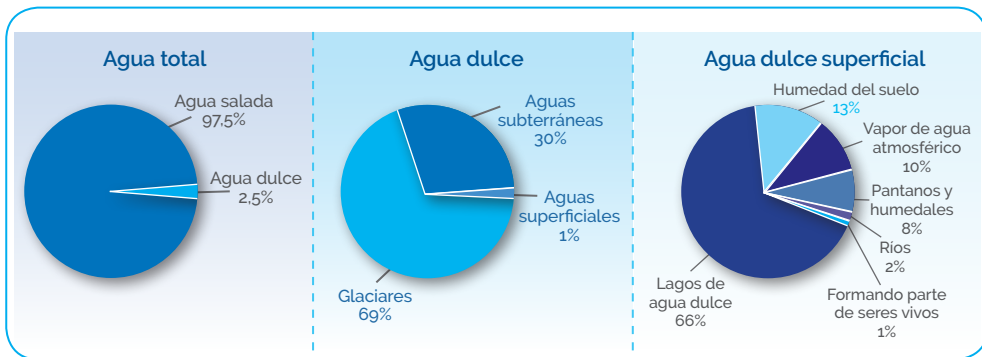


Figura 1.

Distribución del agua en el planeta. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de agua total existente en La Tierra no ha sufrido prácticamente cambios a lo largo del tiempo, pero sí la disponibilidad local de agua dulce ya que esta depende del nivel de precipitaciones, el cual ha ido disminuyendo a nivel mundial debido al cambio climático. Si a esto se le suma el creciente aumento de la demanda de agua dulce y su contaminación debido a las actividades antropogénicas, es fácil de entender el déficit hídrico que sufren muchos países, entre ellos Chile. Actualmente, en numerosas zonas del planeta, el agua dulce se ha convertido en un recurso no renovable ya que su dinámica y renovación a través del ciclo hidrológico ha sido excedida por la velocidad a la que el ser humano la está consumiendo y contaminando, causando que el agua disponible no tenga la calidad apropiada para el uso requerido, o bien, que no sea suficiente.

Esto implica la necesidad de tratar y/o transportar el agua, lo que implica invertir en infraestructuras (plantas de tratamiento de aguas servidas, desaladoras, represas, etc.) y costos operacionales (funcionamiento de dichas infraestructuras y transporte del agua) y, por lo tanto, un consecuente aumento del costo del agua. Por ello, más que hablar de "escasez hídrica" se tendría que hablar de "carestía hídrica".

En Chile, el consumo del agua superficial y subterránea se debe principalmente a la agricultura (72%), seguido del sector sanitario (11%), la industria (7%), la minería (4%), la generación de energía (4%) y el sector pecuario (1%) (Consejo Minero, 2024). La creciente presión sobre el uso del agua en las últimas décadas ha hecho que la agricultura haya optimizado sus sistemas de riego, aunque en la actualidad solo el 51,6% de los terrenos dedicados a cultivos de regadío se aplica riego tecnificado (Instituto Nacional de Estadística, 2024).

Por otra parte, los sectores industrial, minero y pecuario han tenido que buscar recursos hídricos alternativos, lo que los ha llevado a fomentar y maximizar el reúso interno e, incluso, la implementación de procesos de ciclo cerrado de agua (Procházková *et al.*, 2023). De hecho, en algunas industrias e instalaciones pecuarias, el tratamiento de sus aguas residuales no se considera un requerimiento legal, sino una parte del propio proceso de producción. Respecto al sector sanitario, este parece poco motivado en implementar acciones que permitan paliar la escasez hídrica, tales como la mejora de las redes de distribución, que actualmente tienen pérdidas del 33,8% en comparación con el 6-10% que tienen en Europa (Marticorena, 2020), o el reúso de las aguas servidas tratadas, tal como se hace en países como Israel o Túnez que reúsan más del 80% (Yang *et al.*, 2020). A esta inacción hay que sumarle el progresivo aumento del nivel de nitratos de las napas subterráneas en la zona central del país, lo que limita aún más los recursos hídricos disponibles para consumo humano (Escenarios Hídricos 2030, 2018).

El ser humano puede enfrentar los desafíos que presenta el ciclo hidrológico natural a través de la aplicación de tecnología, dado que con ella logra generar agua apta para sus actividades de forma más rápida de lo que la naturaleza puede hacer en base a procesos ambientales. De esta forma, se pueden aprovechar recursos hídricos diferentes a los usados ha-

bitualmente (ríos, lagos y aguas subterráneas), que se pueden denominar como "no convencionales". Entre estos se encuentran el agua de mar, las aguas servidas tratadas, la humedad del aire y la niebla.

Durante las últimas décadas, a nivel mundial, gran parte de los proyectos realizados con el fin de producir agua para actividades humanas se han centrado en el riego agrícola, debido a la alta demanda de agua que requiere la agricultura y, en el caso de Chile, también en el sector minero, construyéndose un número considerable de plantas desaladoras en la zona norte del país. Sin embargo, recientemente, ha ganado mayor atención la implementación de proyectos enfocados en la generación de agua para consumo humano debido al riesgo de escasez de agua en las grandes ciudades. Dichos proyectos requieren aplicar tecnologías muy efectivas y seguras para evitar riesgos en la salud humana.

AGUA DEL MAR

La abundancia de agua de mar en el planeta hace que esta sea el recurso hídrico no convencional más empleado a nivel mundial. La diferencia principal entre ella y el agua dulce, que emplea el ser humano para diversos usos, es su alta concentración de sales. Esta varía desde 10 g/L (Mar Báltico) a los 45 g/L (Golfo Árabe). Dicha variación se debe a factores diversos, tales como los aportes de los ríos, el derretimiento de los casquetes polares, la abundancia de precipitaciones y altas temperaturas que promuevan la evaporación. La salinidad media de referencia del agua de mar se toma como 35 g/L, mientras que la salinidad de las aguas dulces es menor a 1,5 g/L. Por ello, para producir agua dulce a partir de agua de mar, se debe aplicar un proceso que permita separar el agua y las sales.

Esta separación no ocurre de forma espontánea, sino que necesita un aporte de energía que impulse dicho proceso. Inicialmente, para producir agua dulce a partir de agua de mar se aplicaba el proceso de destilación que consistía en la evaporación mediante el aporte de calor, proporcionado por procesos de combustión (Figura 2.a). Sin embargo, el costo de los combustibles y el alto requerimiento energético (10-15 kWh/m³ (Ettouney y Wilf, 2009)) han hecho que este proceso fuese cayendo en desuso y que,

actualmente, en su lugar se aplique el proceso de ósmosis inversa el cual consiste en la filtración a través de membranas poliméricas, que permiten el paso selectivo del agua e impiden el paso de las sales (membranas semipermeables) usando como fuerza impulsora la presión mecánica (Figura 2.b).

Esta tecnología presenta un requerimiento energético de 4-5 kWh/m³ (Nurjanah *et al.*, 2024). Hoy en día, en todo el mundo, hay más de 11.000 plantas desaladoras de agua marina, de las cuales casi el 70% usa el proceso de filtración (Curto *et al.*, 2021). En Chile, actualmente se encuentran en operación 22 plantas desaladoras de las cuales 9 son para proveer de agua al sector minero (capacidad total: 5,8 m³/s), 10 a industrias (capacidad total: 0,5 m³/s) y 3 se ubican en Antofagasta, Tocopilla y Atacama, para producir agua potable (capacidad total: 2,2 m³/s). Además, hay 6 plantas más en construcción: 4 de ellas tienen fines mineros, 1 es multipropósito y 1 para agua de consumo humano (Desaladora Antofagasta). A estas se le suman, al 2024, 15 desaladoras más en fase de proyecto: 5 para operaciones mineras, 5 multipropósito, 3 para la industria y 2 para agua potable (Pais Circular, 2024). Estas proyecciones indican que Chile está apostando fuertemente por el agua de mar como recurso hídrico no convencional dado su extenso borde costero.

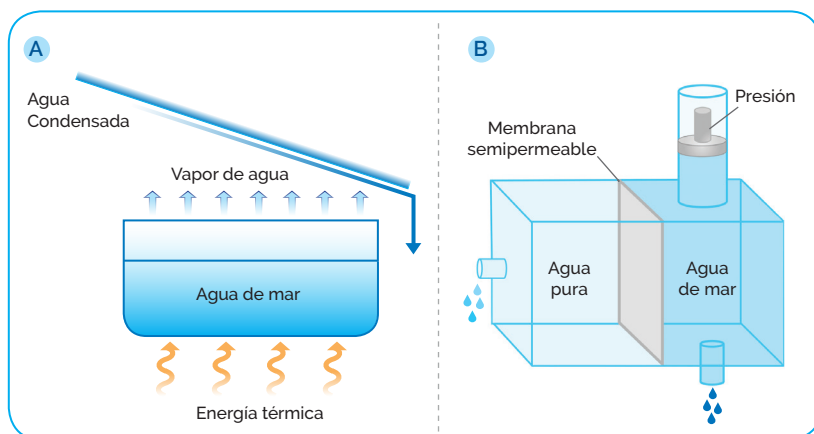


Figura 2.

Procesos para la obtención de agua potable a partir de agua de mar: a) proceso térmico (destilación); b) proceso con membranas (ósmosis inversa). Fuente: Elaboración propia.

Según lo restrictiva que sea la membrana al paso de compuestos que puedan estar presentes en el agua, existen varios tipos de filtración: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Esta última es la más selectiva y la única capaz de retener las sales disueltas en el agua del mar con muy alta eficacia (Figura 3). Esta mayor restricción al paso de compuestos hace que se requiera una mayor cantidad de energía para producir un determinado volumen de agua en comparación con los otros tipos de filtración. En el caso del agua de mar, las membranas de ósmosis inversa son operadas a presiones de entre 55 y 70 atmósferas (como referencia: la presión de una rueda de un auto es de unas 2 atmósferas), lo que causa que el proceso de filtración consuma en torno al 84% de la energía asociada a la producción de agua desalada (Mollahosseini y Abdelrasoul, 2020). El restante 16% corresponde a la captación del agua de mar, al pretratamiento aplicado, para que las condiciones fisicoquímicas del agua sean las adecuadas, con el fin de no dañar las membranas de ósmosis inversa y al post-tratamiento del agua desalada, que consiste en una remineralización para que su calidad sea apta para consumo humano.

El consumo de energía de la etapa de ósmosis inversa se ha ido reduciendo considerablemente en los últimos 30 años, debido a los avances de la tecnología. De hecho, en las plantas desaladoras más modernas, está muy próximo al mínimo requerido teóricamente, por lo que se podría descartar futuras mejoras considerables en este aspecto (Elimelech y Phillip, 2011; Feo-García *et al.*, 2024). El proceso de ósmosis inversa genera también una corriente concentrada en sales que se denomina rechazo o concentrado y cuyo volumen es similar al del agua desalada producida, es decir, del agua de mar procesada el 50% se recupera como agua desalada y el otro 50% se devuelve al mar con el doble de concentración de sal (≈ 70 g/L).

Este porcentaje de recuperación de agua permite minimizar los costos de operación de la planta desaladora ya que, al operar con un porcentaje de recuperación alto, implicaría que la corriente de rechazo fuese más concentrada y que hubiese que aplicar una mayor presión en el sistema de ósmosis inversa para obtener agua, mientras que operar con un porcentaje de recuperación bajo supondría un aumento de los costos de bombeo y pretratamiento para obtener un determinado volumen de agua (Greenlee *et al.*, 2009). Con el fin de evitar de minimizar los impactos sobre los eco-

sistemas marinos, la corriente de rechazo se descarga al mar mediante tuberías con difusores, de forma que pueda diluirse lo más rápidamente posible.

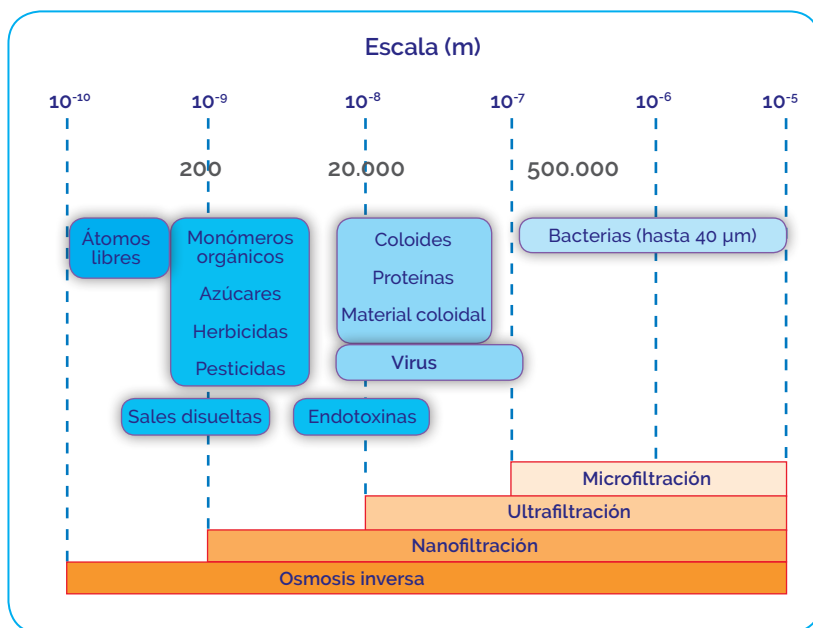


Figura 3.

Capacidad de eliminación de contaminantes de los distintos tipos de filtración con membranas. Fuente: Elaboración propia.

El alto consumo energético del proceso de ósmosis inversa influye de manera considerable en el costo de producción del agua, que oscila entre 0,45 y 2,5 US\$/m³ (Crutchik y Campos, 2021). En el caso de Chile, el costo del agua en las ciudades abastecidas con agua desalada es de 2,4±0,2 US\$/m³ el cual es notablemente superior al costo del agua obtenida a partir de recursos hídricos convencionales (1,1±0,4 US\$/m³) (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2024). Si los sitios en donde se va a usar el agua están lejos de la costa y/o a una gran altitud (por ejemplo, las faenas mineras), estos costos pueden duplicarse o, incluso, triplicarse debido al consumo energético del bombeo y a la infraestructura necesaria para el

transporte del agua (García, 2017). En estos casos, la explotación de otros recursos hídricos no convencionales pueda ser más económica que la obtención de agua del mar.

AGUAS SERVIDAS TRATADAS

Históricamente el tratamiento de aguas servidas tenía como propósito el saneamiento de las ciudades y pueblos, eliminando los contaminantes de forma que no causaran problemas de salud sobre la población, ni impactos ambientales sobre los cuerpos de agua receptores. Sin embargo, en estos últimos años, el concepto de la planta de tratamiento ha evolucionado hacia el concepto de "biofactoría", cambiando su objetivo de "eliminar contaminantes" a "recuperar recursos". Esto es debido a que las aguas servidas han dejado de ser vistas como un residuo y han comenzado a percibirse como una fuente de productos valiosos. Los esfuerzos iniciales en la recuperación de recursos se han centrado en:

- 1) Materia orgánica:** se puede convertir mediante procesos biológicos anaerobios en biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono) que es usado como fuente de energía renovable.
- 2) Nutrientes (nitrógeno y fósforo):** pueden ser usados como fertilizantes.
- 3) Biosólidos (comúnmente conocidos como lodos):** se generan como subproducto del propio tratamiento y que pueden usarse como fertilizante orgánico (Verstraete *et al.*, 2009).

No obstante, el actual escenario de escasez hídrica a nivel global ha hecho que la propia agua sea el recurso más valioso que contiene el agua servida (Tabla 1).

Tabla 1.

Potencial de recuperación de recursos del agua servida.

Fuente: Verstraete *et al.* (2009).

Potencial de recuperación	Cantidad por m ³ de agua servida	Precio de mercado	Valor por m ³ de agua servida
Agua	1 m ³	0,250 US\$/m ³	0,25 US\$
Metano	0,14 m ³	0,338 US\$/m ³ metano	0,05 US\$
Nitrógeno	0,05 kg	0,215 US\$/kg	0,01 US\$
Fertilizante orgánico	0,10 kg	0,200 US\$/kg	0,02 US\$
Fósforo	0,01 kg	0,700 US\$/kg	0,01 US\$
TOTAL:			0,35 US\$

Los efluentes generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) requieren mayor atención, debido a que el recurso hídrico se genera a una distancia relativamente corta respecto a la zona donde se va a emplear, lo que disminuye los costos asociados al transporte. Además, la producción de dichos efluentes es constante, lo que garantiza que la generación de los nuevos recursos hídricos sea independiente de las condiciones estacionales. La producción de aguas servidas a nivel mundial es 360 km³/año (Jones *et al.*, 2021) y en Chile de 1,23 km³/año (Asociación Nacional de Empresas de Servicios Sanitarios A.G., 2017). Se estima que, a nivel mundial, este recurso hídrico podría ser capaz de cubrir hasta 80% de las necesidades de agua dulce por parte de la población y la industria (Qin *et al.*, 2006). Por lo tanto, las actuales PTAS deben comenzar a ser vistas como fábricas de agua.

Habitualmente, las aguas servidas son tratadas con una serie de procesos que permiten disminuir su carga de contaminantes hasta los límites requeridos por la normativa, con el fin de proteger la salud humana y minimizar su impacto ambiental. Una vez tratadas, estas aguas se devuelven habitualmente a un cuerpo de agua (río, lago o mar), incorporándose de nuevo al ciclo hídrico, lo que permite que la carga contaminante remanente del agua servida tratada sea eliminada mediante los propios procesos naturales involucrados en el ciclo hídrico. En el caso de reusar el agua servida tratada para algún fin, se debe adecuar previamente su calidad con sistemas de post-tratamiento de acuerdo con las necesidades del uso que se le vaya a dar (Figura 4). La aplicación de este post-tratamiento se denomina "regeneración" del agua.

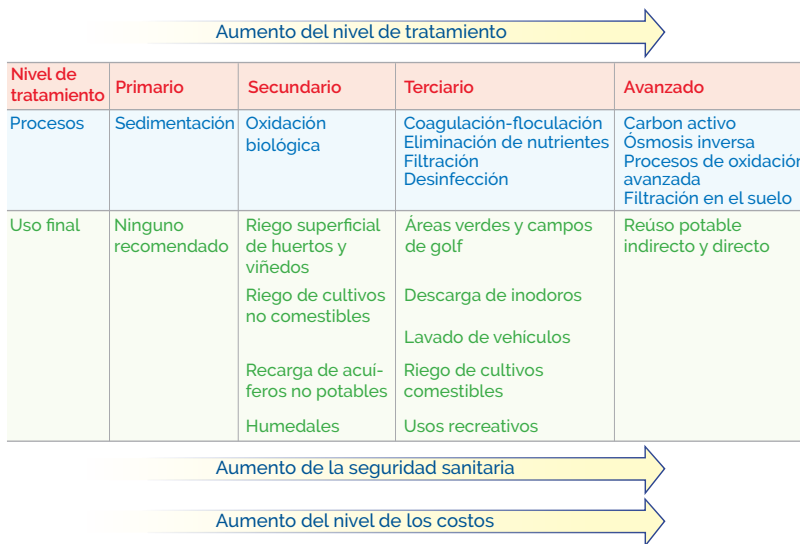


Figura 4.

Grado de post-tratamiento requerido por el efluente de las PTAS dependiendo de su uso final. Fuente: Elaborado a partir de Tram Vo *et al.* (2014).

El reúso de aguas servidas tratadas se puede dividir en tres grandes categorías principales: reúso no potable, reúso industrial y reúso potable (directo o indirecto). El reúso no potable incluye irrigación y paisajismo (zonas agrícolas, parques y zonas verdes), usos urbanos (limpieza de calles, lavado de autos), usos domésticos (descarga de inodoros y limpieza) y recarga de cuerpos de cuerpos hídricos (ríos y acuíferos) no destinados al suministro de agua para consumo humano. El reúso industrial puede incluir refrigeración, agua de proceso y limpieza. A nivel mundial, se reúsa menos del 4% del agua servida tratada (Capodaglio, 2020), siendo el 97,7% para reúso no potable e industrial y solamente el 2,3% para reúso potable (Figura 5). En el caso de Chile, actualmente solo se reúsa el 2% de las aguas servidas tratadas, las cuales son destinadas a riego agrícola (Ministerio de Obras Públicas, 2019).

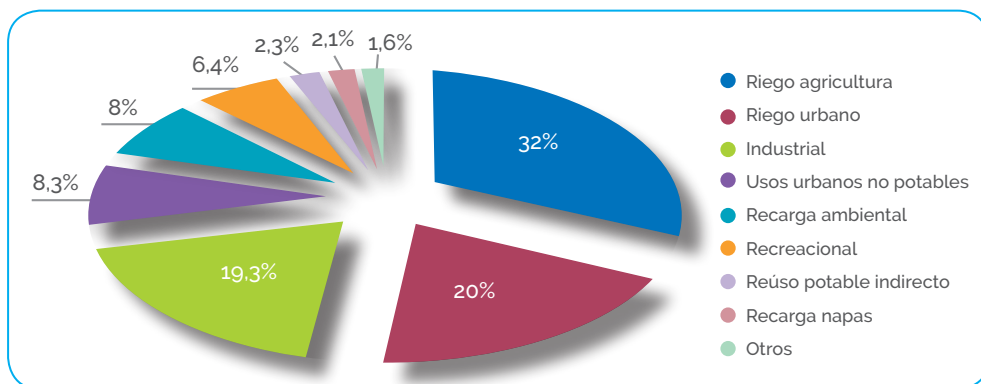


Figura 5.

Aplicaciones del agua residual regenerada a nivel mundial.

Fuente: Capodaglio (2020).

La regeneración de aguas servidas para el suministro de agua potable ya está siendo llevada a cabo en muchos lugares en todo el mundo (Tabla 2). La gran mayoría de las aplicaciones se basan en sistemas de reúso potable indirecto en los que el agua servida tratada, una vez es regenerada, se descarga a un suministro de agua cruda (por ejemplo, reservas de agua superficial o acuíferos) con el fin de almacenarla y también de mejorar su calidad (Figura 6). En la actualidad, solo hay 4 plantas que usan sistemas de reúso potable directo (Windhoek (Namibia), Big Springs (EE.UU.), Beaufort West (Sudáfrica) y El Paso (EE.UU.)) (Tabla 2).

En ellos, las aguas servidas regeneradas se introducen directamente en el sistema de suministro de agua municipal bajo un constante monitoreo, para asegurar que cumplen con la norma de calidad requerida. En este caso, el agua regenerada puede mezclarse con otra fuente de agua antes de su potabilización, mezclarse con otra fuente de agua ya potabilizada o suministrarse directamente a los usuarios (Figura 6). El reúso potable directo ofrece principalmente dos ventajas: 1) reducir la distancia a la que debería ser bombeada el agua regenerada y; 2) garantizar el total reúso del agua regenerada usando la infraestructura de distribución de agua disponible. Ambas ventajas contribuirían a la disminución de los costos pero también hay un mayor riesgo sanitario asociado al reúso directo, por lo que su implementación sigue siendo un gran desafío.

Tabla 2.

Instalaciones a nivel mundial de reúso de agua servida tratada para uso potable. Fuente: Capodaglio (2020).

Lugar	Año	Estado	Tamaño (10 ³ m ³ /d)	Tipo de reúso potable
Montebello (USA)	1962	Operativa	170	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Fairfax (USA)	1978	Operativa	200	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
El Paso (USA)	1985	Operativa	38	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Clayton County (USA)	1985	Operativa	68	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
West Basin (USA)	1995-2014	Operativa	66	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Gwinnett County (USA)	1999	Operativa	227	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
Scottsdale (USA)	1999-2014	Operativa	75	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Terminal Island (USA)	2002-2014	Operativa	23	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Long Beach (USA)	2009	Operativa	30	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Chino Basin (USA)	2007	Operativa	68	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Orange County (USA)	2008-2014	Operativa	380	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Arapahoe (USA)	2009	Operativa	34	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Aurora (USA)	2010	Operativa	190	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Big Spring (USA)	2013	Operativa	7	Reúso directo: Mezcla + Potabilización
Cambria (USA)	2014	Operativa	2,5	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
El Paso (USA)	2020	En construcción	38	Reúso directo: Directo a distribución
Windhoek (Namibia)	1969-2010	Operativa	21	Reúso directo: Mezcla + Potabilización
Wulpen (Bélgica)	2002	Operativa	7	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos
Singapur (3 plantas)	2003-2010	Operativa	600	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
Langford (Reino Unido)	2003	Operativa	30	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
Southeast Queensland (AUS)	2008	Operativa	231	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
George (Sudáfrica)	2009	Operativa	10	Reúso indirecto: Aumento de recursos hídricos superficiales
Beaufort West (Sudáfrica)	2011	Construida	1	Reúso directo: Mezcla con agua potabilizada
Perth (Australia)	2016	Operativa	38	Reúso indirecto: Recarga de acuíferos

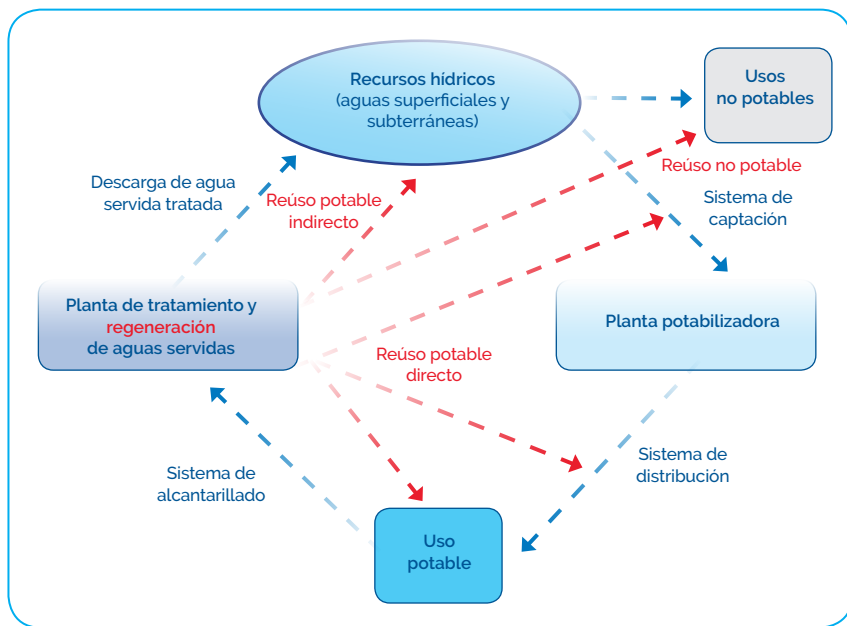


Figura 6.

Estrategias de reúso de las aguas servidas regeneradas.
Fuente: Elaboración propia.

El diseño de un sistema de recuperación y reúso de aguas servidas tratadas pasa por definir inicialmente la calidad necesaria del agua regenerada de acuerdo con su uso final, lo que determinará el nivel de tratamiento requerido y, por lo tanto, la elección de las tecnologías a aplicar. El diseño del esquema debe tener en cuenta tanto la calidad de las aguas servidas tratadas y su variabilidad como los requisitos de calidad del propósito del uso y la confiabilidad de la operación. Estos son aspectos especialmente importantes en el caso de que el agua sea destinada a consumo humano. En este sentido, el sistema de regeneración del agua debe garantizar la protección de la salud de los potenciales consumidores y de sus operarios. Cabe destacar que no existe ningún proceso de tratamiento que por sí solo sea capaz de garantizar la seguridad operacional requerida durante la regeneración, especialmente para un reúso potable. Por lo tanto, se aplica un enfoque “multibarrera”, basado en un tren de regeneración que incluye

diferentes procesos para poder eliminar una amplia gama de contaminantes. En el caso del reúso directo como agua potable, el tren de regeneración debe ser (Roccaro, 2018):

1. **Redundante:** incluir varios procesos que puedan eliminar el mismo contaminante de modo que si uno falla o debe ser retirado temporalmente de servicio para su mantenimiento el tren de regeneración siga siendo eficaz.
2. **Robusto:** compuesto por una combinación de procesos que puedan eliminar una amplia gama de contaminantes, poniendo especial énfasis en los contaminantes emergentes.
3. **Resiliente:** existencia de protocolos y estrategias para solucionar fallas y volver a poner los sistemas en línea en tiempos relativamente cortos.

Los trenes de regeneración destinados a la producción de agua para consumo humano usan diversas combinaciones de procesos de tratamiento avanzado en serie (ej. adsorción con carbón activo, microfiltración, ósmosis inversa, oxidación avanzada, etc.), no existiendo un diseño estandarizado (Figura 7). Entre los procesos más aplicados destaca la ósmosis inversa dado que garantiza una alta calidad del agua producida y una operación confiable. De hecho, más del 70% de los trenes de regeneración implementados a partir del año 2000 usan este proceso, llegando a 100% cuando se trata de reúso directo como agua potable (Capodaglio, 2020). Como se ha mencionado en la sección anterior, el principal inconveniente del proceso de ósmosis inversa es su alta demanda energética. En este caso, el consumo energético es considerablemente menor que en el del agua de mar (0.6-0.8 kWh/m³ de agua producida (Bai *et al.*, 2020) dado que el bajo contenido salino de las aguas servidas tratadas hace que las presiones de operación sean menores (17-19 atmósferas). Esto causa que el costo de producción del agua sea también menor (0,60-1,00 US\$/m³ (Leverenz *et al.*, 2011). Aunque actualmente en Chile no hay ninguna instalación de regeneración aguas servidas tratadas, un estudio de prefactibilidad económica realizado en base a regenerar entre el 20 y el 50% del agua servida tratada por la PTAS La Farfana (Aguas Andinas) y transportarla a la planta potabilizadora más cercana, dio como resultado un costo de 0,72-0,84 US\$/m³, el cual es considerablemente inferior al precio del agua pagado en las ciudades chilenas abastecidas con agua desalada (Jil, 2021).

Se debe tener en cuenta que cuando se aplica el proceso de ósmosis inversa en el tren de regeneración va a producirse una corriente de rechazo (15-25% del agua procesada) que debería ser tratada en el caso de que no cumpla con los requerimientos de vertido. Para ello, dicha corriente podría retornarse a la propia PTAS o tratarse directamente con un sistema implementado específicamente con este fin.

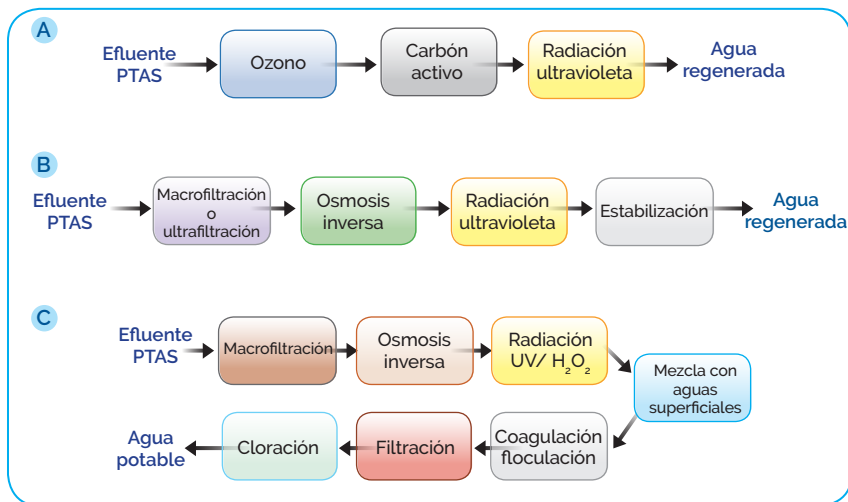


Figura 7.

Ejemplos de trenes de regeneración para la obtención de agua potable: Reúso indirecto a) Southeast Queensland (AUS); b) Singapur; Reúso directo: c) Big Spring (USA). Fuente: Gerrity *et al.* (2013).

HUMEDAD DEL AIRE

La atmósfera contiene agua, en forma de vapor (humedad) y/o líquida (niebla), que puede recolectarse mediante diversas técnicas. En el caso del vapor de agua, se requiere un proceso que lo condense a fase líquida mientras que para la niebla se necesita un sistema que permita la captura y recolección de las gotas. Este apartado se centrará en la obtención de agua a partir de la humedad mientras que el siguiente se enfocará en la captación de las gotas de niebla.

La humedad del aire atmosférico es una fuente renovable de agua dulce que contiene alrededor de $13 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ de agua, lo que representa el 0,04% del agua dulce del planeta (Bengtsson, 2010). Su extracción no tiene un impacto ambiental negativo ya que la humedad eliminada se repondrá naturalmente por el ciclo hidrológico. El uso de este recurso hídrico no convencional tiene una serie de ventajas entre las que destacan que:

1. Está disponible en cualquier lugar del planeta, dado que el agua está asociada al aire y no a un determinado cuerpo o corriente hídrica, por lo que su uso podría ser de especial interés en zonas remotas de bajas precipitaciones.
2. El aprovechamiento es del 100% del agua, por lo que no se generan corrientes residuales, a diferencia de cuando se usa agua de mar y aguas residuales tratadas.
3. La tecnología usada es relativamente sencilla y se puede implementar a pequeña escala, lo que facilita su aplicación in-situ.

Como se mencionó anteriormente, para obtener agua a partir de la humedad del aire, es necesario que esta humedad pase de estado gaseoso al líquido. Para ello, el proceso más habitualmente empleado es el de condensación que consiste en enfriar el aire para que disminuya su capacidad de contener vapor de agua y éste se separe del aire en forma líquida (Figura 8). Con este fin, se usa un sistema similar al empleado en los refrigeradores, aparatos de aire acondicionado y deshumidificadores: un circuito cerrado que contiene un gas refrigerante.

Inicialmente, este gas se comprime usando energía eléctrica y, luego, se lleva a una cámara que está en contacto con el ambiente (condensador) en donde enfría y se convierte en líquido a alta presión. Posteriormente, este líquido es liberado, mediante una válvula, a una cámara de baja presión (evaporador) lo que provoca que éste se evapore. Para ello, necesita calor el cual toma del aire que se pone en contacto con dicha cámara, lo que hace que el aire se enfríe y la humedad que contiene acabe condensando. Para aumentar la eficacia energética del proceso, el aire frío y seco generado se aprovecha para enfriar previamente el aire de entrada.

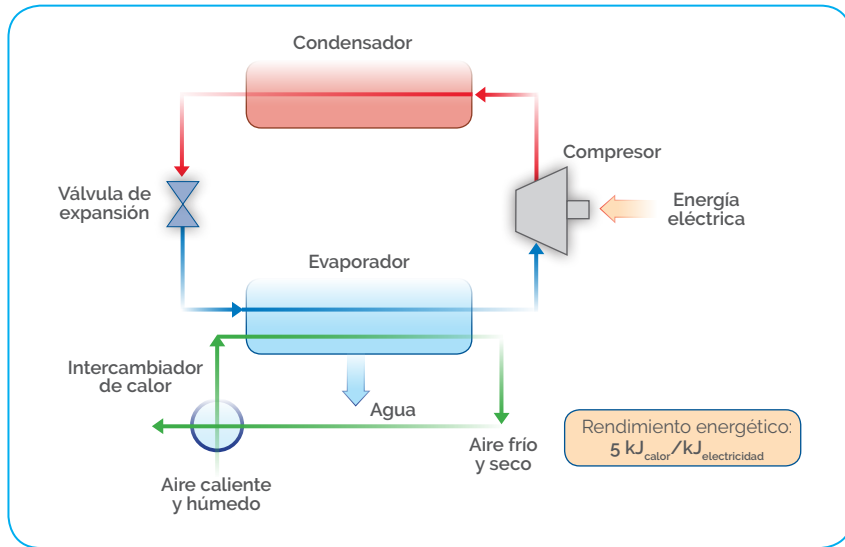


Figura 8.

Sistema de condensación de la humedad presente en el aire.
Fuente: Elaboración propia.

Enfriar el aire implica un alto consumo de energía (electricidad) lo que supone la principal desventaja del uso de esta fuente no convencional de agua (Salehi *et al.*, 2020). Por otra parte, la cantidad de agua obtenida al enfriar el aire dependerá de la cantidad de humedad que éste contenga y de su temperatura, es decir, de las condiciones meteorológicas por lo que el costo de producción del agua variará notablemente dependiendo del lugar de aplicación (Brenes y Chini, 2023; Faraz Ahmad *et al.*, 2022). A menor cantidad de humedad, mayor va a ser el costo energético de obtener el agua. Una vez obtenida el agua, ésta se somete generalmente a un proceso de filtración mediante carbón activo y después a un proceso de desinfección mediante luz ultravioleta lo que la haría segura para el consumo humano.

El sistema anteriormente descrito es comúnmente usado en aparatos comerciales por lo que su adaptación para la generación de agua ya está siendo ampliamente comercializada. En este aspecto, un reciente estudio (datos no publicados) sobre el costo de producir agua potable en Arica

mediante la deshumificación del aire (datos no publicados). Los resultados indican que, usando energía eléctrica de la red, el costo del agua sería de en torno a 82,34 US\$/m³ (Figura 9). Dado que gran parte de este costo (78,1%) es debido al consumo eléctrico, se hizo una segunda evaluación en donde de propuso el uso de paneles fotovoltaicos para suministrar la energía requerida. En este caso, el costo de producción del agua se redujo hasta 17,04 US\$/m³, lo cual hace este sistema competitivo en zonas rurales que habitualmente son abastecidas con camiones albije.

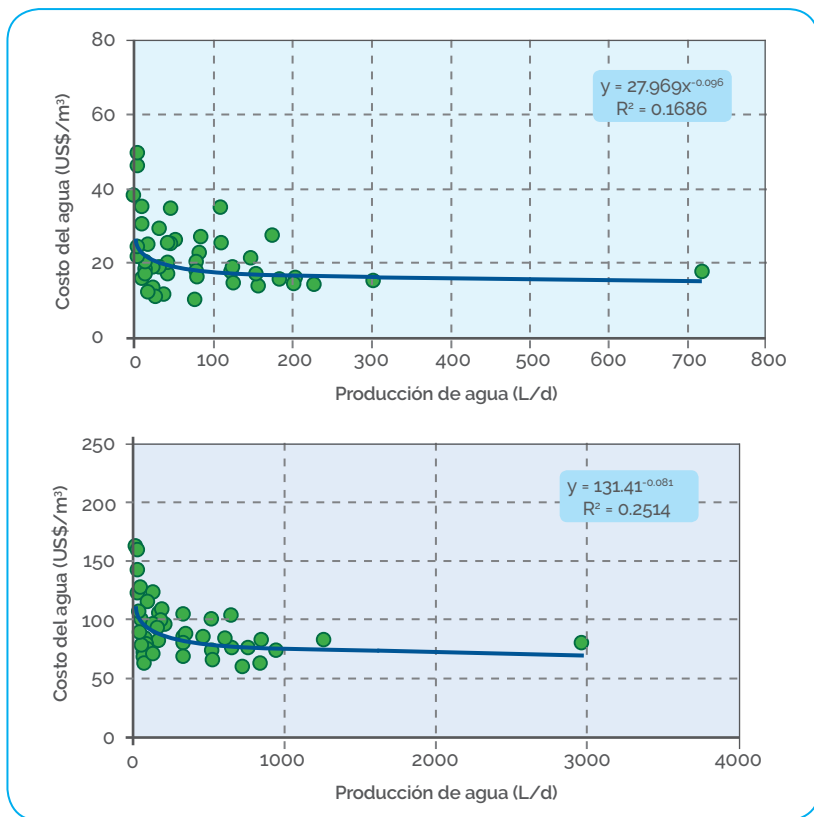


Figura 9.

Costo de producción de agua potable mediante sistemas de condensación de la humedad del aire en Arica: A) Sistemas alimentados con energía de la red eléctrica; B) sistemas alimentados con energía de paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

CAPTURA DE AGUA DE NIEBLA

La niebla puede definirse como la presencia de gotas de agua líquida, con diámetros entre 1 y 50 μm , en suspensión en el aire a nivel del suelo (Ritter *et al.*, 2008). La niebla puede formarse sobre el océano, donde el aire húmedo pasa sobre aguas más frías, causando la condensación de parte de esa humedad y formando nubes de baja altitud que luego son arrastradas hacia la costa por el viento (Hiatt *et al.*, 2012). La niebla también puede formarse cuando una masa de aire húmedo se encuentra con una elevación de terreno lo que causa que dicha masa de aire ascienda en la atmósfera provocando su enfriamiento y la posterior condensación de parte de su vapor de agua (Straub *et al.*, 2012). En base a lo comentado, se puede deducir que una región costera con zona montañosa es un escenario propicio para recolectar agua de niebla, tal como ocurre en una parte importante del borde costero de Chile.

La captura de agua de niebla se realiza mediante una tecnología simple, los atrapanieblas, siendo Chile pionero a nivel mundial en su uso y diseño (Figura 10). Estos consisten en una malla, habitualmente tipo Raschel, expuesta a la atmósfera y a través de la cual pasa la niebla, impulsada por el viento. Parte de las gotas de niebla impactan sobre el material de la malla y se van acumulando sobre éste hasta que se forma una gota de un tamaño suficiente para deslizarse por el material de la malla hacia una canaleta, donde se recolecta y se conduce a un tanque de almacenamiento.

Debido al diseño relativamente simple de los atrapanieblas, su costo de operación es nulo dado que la recolección de la niebla es un proceso pasivo en el que la energía necesaria es suministrada por el propio viento, aunque sí tiene costos mínimos de mantenimiento para garantizar la eficiencia de captura de las gotas. Dentro de las limitaciones que presenta la producción de agua a partir de la niebla se podrían mencionar que la recolección de agua depende de las condiciones meteorológicas, siendo estas propicias solamente en zonas geográficas muy concretas; y la capacidad de producción es relativamente baja. Esta pueda variar de los 96 a los 800 litros al día (con niebla) para un atrapanieblas de un tamaño habitual de 40 m^2 (Domen *et al.*, 2014).

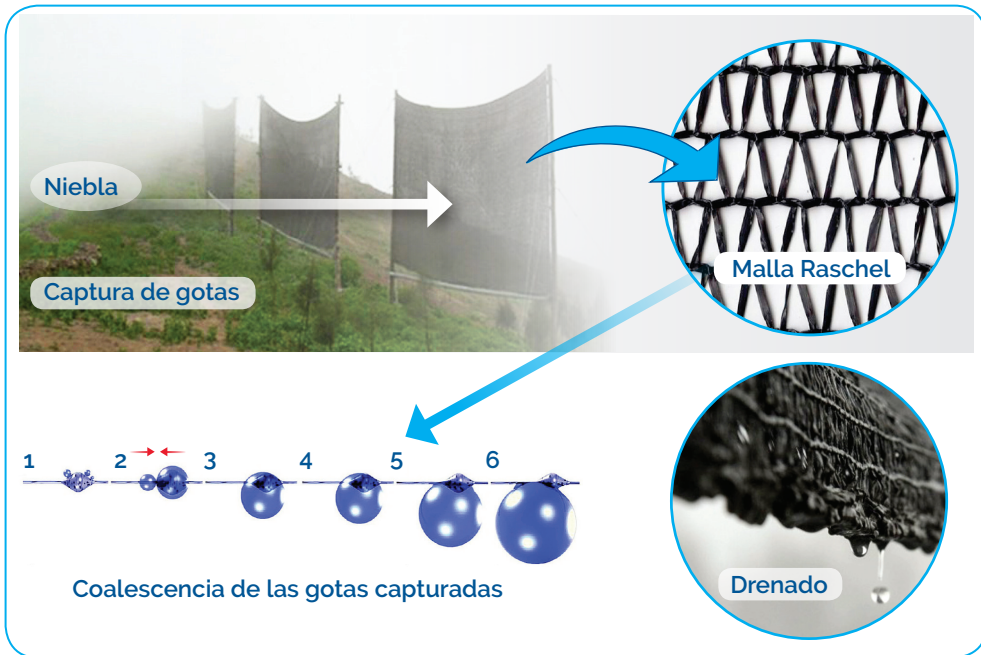


Figura 10.

Atrapanieblas y el proceso de obtención de agua a partir de la niebla
Fuente: Elaborado a partir de Domen *et al.* (2014).

La gran variación en los costos de material y mano de obra necesarios para la fabricación de los atrapanieblas, la presencia o ausencia de subsidios y la diferente eficacia de captura de la niebla obtenida en distintos lugares causan que el intervalo de costos asociados a la producción de agua sea muy amplio: de 1,49 a 17,70 US\$/m³ (Qadir *et al.*, 2018). En el caso de Chile, LeBoeuf y de la Jara estimaron un costo mínimo de producción entre 1,1 y 2,7 US\$/m³ (LeBoeuf y de la Jara, 2014).

CONCLUSIONES

El agua de mar y las aguas servidas tratadas son recursos hídricos no convencionales con alta disponibilidad, la cual no depende de las condiciones climatológicas, por lo que se pueden usar para abastecer de forma segura a un gran número de habitantes, sobre todo a aquellos que viven en ciudades. El proceso de desalación de agua de mar es ampliamente usado a nivel mundial y no presenta riesgos operacionales en cuanto a la calidad del agua generada, siendo el requerimiento energético su mayor punto débil.

En este sentido, la destilación solar, en la que Chile fue pionero, podría ser una interesante alternativa para aplicar en la zona norte del país debido a su alto nivel de radiación solar. Esta tecnología ya fue implementada en dicha zona a finales del siglo XIX con el fin de abastecer de agua a las faenas mineras pero que finalmente acabo en desuso cuando finalizó el auge de la industria del salitre (Hirschmann, 1975). La puesta al día de esta tecnología mediante, por ejemplo, el uso de sistemas de concentración solar podría abrir una alternativa económicamente competitiva con las plantas desaladoras basadas en la filtración con membranas de ósmosis inversa.

El uso de agua de mar como recurso hídrico no convencional tiene el inconveniente intrínseco de que, en el caso de las ciudades interiores, el agua generada debe ser transportada lo que genera un incremento muy importante en los costos de producción, dependiendo principalmente de la distancia y la elevación. En este sentido, las aguas servidas tratadas toman ventaja ya que están disponibles en las proximidades de los lugares en donde se requiere el agua. En todo caso, debe tenerse en cuenta que la regeneración del agua para un posterior reuso puede tener un impacto en los niveles del cauce receptor del efluente de la PTAS, lo que podría afectar a las especies de flora y fauna presentes en él. Por lo tanto, cuando la descarga de la PTAS se realiza a un río o arroyo con bajo caudal, la necesidad de mantener un caudal ecológico podría limitar la cantidad de agua que se puede regenerar durante las estaciones más secas.

La tecnología actual de regeneración proporciona soluciones fiables y económicamente factibles para su reuso para consumo humano, siendo la percepción pública el gran obstáculo a superar. Sin embargo, la aceptación por parte de las personas puede lograrse con campañas publicitarias y de concienciación tal como se hizo en Singapur, donde se mostró que la calidad del agua regenerada es, incluso, superior al del agua potable obtenida de recursos hídricos convencionales (Bai *et al.*, 2020). En el caso de Chile, quizás, la mayor barrera a superar para el uso de las aguas servidas tratadas como un nuevo recurso hídrico viene dada por aspectos legales sobre su propiedad.

En este sentido, existen dos interpretaciones sobre la propiedad de las aguas servidas: 1) la empresa sanitaria funciona como gestora de un producto residual que es el agua servida, procesándolo y convirtiéndolo en un producto de valor añadido que es agua tratada/regenerada, la cual podría comercializar; 2) la empresa sanitaria tiene como función depurar el agua servida, servicio por el que cobra y debe devolver el agua tratada al ambiente. Este tema genera mucha incertidumbre al momento de invertir en proyectos de regeneración de aguas servidas tratadas, por lo que urge solucionarlo con el fin de aprovechar un recurso hídrico no convencional tan abundante.

La producción de agua a partir de la humedad del aire es mucho más costosa que a partir de agua de mar o aguas servidas tratadas, dado que la escala de la tecnología empleada es mucho menor. Aun así, la humedad del aire puede ser un recurso hídrico no convencional a tener en cuenta para zonas rurales interiores ya que, si se realiza el suministro de energía mediante paneles fotovoltaicos, la producción de agua podría tener costos similares a los del suministro actual mediante camiones cisterna. Además, presenta la ventaja de que estos costos no dependerían de las condiciones del mercado ni de la disponibilidad de fuentes de agua convencionales cercanas, lo que garantizaría la seguridad hídrica en dichas zonas.

El principal inconveniente para la implementación de este tipo de sistemas sería la inversión de capital inicial, especialmente en el caso de utilizar paneles fotovoltaicos, lo que hace que los subsidios estatales seguramente jueguen un rol fundamental en el fomento del uso de equipos

de condensación de la humedad del aire. El dimensionamiento de estos sistemas para cubrir una cierta demanda de agua debería tener en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas sobre la tasa de producción de agua.

Respecto a la producción de agua a partir de la niebla, su aplicación se ve limitada a zonas geográficas concretas y su tasa de generación depende notablemente de las condiciones meteorológicas. Hay que tener en cuenta que la existencia de niebla en una zona no implica que se pueda obtener agua mediante los atrapanieblas ya que se necesita también una mínima velocidad del viento para que la captura de las gotas de agua sea efectiva. La niebla puede considerarse un recurso hídrico no convencional muy factible de ser explotado en determinadas localidades pequeñas de la costa en las zonas del norte y centro de Chile. Y aunque los atrapanieblas son sistemas que no requieren energía, el costo del agua producida es relativamente alto debido a la relación entre los costos de capital iniciales y la cantidad de agua que se logra producir. En este sentido, un desafío pendiente es el diseño de atrapanieblas sencillos, con bajos costos de capital, que logren aumentar la eficacia de captación de las gotas y, así, disminuir los costos de producción del agua.

Cada uno de los recursos hídricos no convencionales analizados presenta características diferentes, lo que hace que sus nichos de aplicación también lo sean. La combinación de todos ellos permitiría paliar la escasez hídrica, que está sufriendo Chile durante los últimos años, tanto en zonas urbanas en donde la economía de escala es más favorable y se cuenta con más infraestructura (por ejemplo, plantas de tratamiento de aguas servidas) como en zonas rurales en donde la población está más esparcida y la infraestructura es muchas veces inexistente.

REFERENCIAS

- Asociación Nacional de Empresas de Servicios Sanitarios A.G. 2017. Reporte de la Industria del Agua Urbana en Chile 2017.
- Bai, Y., Shan, F., Zhu, Y., Yao, Xu, J., Yi, Wu, Yun sheng, Luo, X. geng, Wu, Yin hu, Hu, H.Y., Zhang, B. lin. 2020. Long-term performance and economic evaluation of full-scale MF and RO process – A case study of the changi NEWater Project Phase 2 in Singapore. *Water Cycle* 1. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.09.001>
- Baker, B., Aldridge, C., Omer, A. 2016. Water: Availability and use. Mississippi State University Extension 2016, p3011–p3011.
- Bengtsson, L. 2010. The global atmospheric water cycle. *Environmental Research Letters* 5. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025002>
- Brenes, A.T., Chini, C.M. 2023. Temporal and spatial variability of energy intensity for atmospheric water generators. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* 3. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/accec9>
- Capodaglio, A.G. 2020. Fit-for-purpose urban wastewater reuse: Analysis of issues and available technologies for sustainable multiple barrier approaches. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1763231>
- Consejo Minero. Plataforma de Aguas. Disponible en: <https://consejominero.cl/plataformas-digitales/agua/>
- Crutchik, D., Campos, J.L. 2021. Municipal wastewater reuse: Is it a competitive alternative to seawater desalination? *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su13126815>
- Curto, D., Franzitta, V., Guercio, A. 2021. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/app11020670>

- García, N. 2017. Análisis económico de aspectos asociados a la desalinización del agua en la minería. Colección Biblioteca Nacional de Chile.
- Domen, J.K., Stringfellow, W.T., Camarillo, M.K., Gulati, S. 2014. Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy* 16. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0645-z>
- Elimelech, M., Phillip, W.A. 2011. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 333. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Escenarios Hídricos 2030. 2018. Resumen estratégico. Radiografía del agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile.
- Ettouney, H., Wilf, M. 2009. Conventional Thermal Process, in: *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01150-4>
- Faraz Ahmad, F., Ghenai, C., Al Bardan, M., Bourgon, M., Shanableh, A. 2022. Performance analysis of atmospheric water generator under hot and humid climate conditions: Drinkable water production and system energy consumption. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100270>
- Feo-García, J., Pulido-Alonso, A., Florido-Betancor, A., Florido-Suárez, N.R. 2024. Cost Studies of Reverse Osmosis Desalination Plants in the Range of 23,000–33,000 m³/day. *Water* 16. <https://doi.org/10.3390/w16060910>
- Gerrity, D., Pecson, B., Shane Trussell, R., Rhodes Trussell, R. 2013. Potable reuse treatment trains throughout the world. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 62. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.041>

- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B., Moulin, P. 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research* 43. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>
- Hiatt, C., Fernandez, D., Potter, C. 2012. Measurements of Fog Water Deposition on the California Central Coast. *Atmospheric and Climate Sciences* 02. <https://doi.org/10.4236/acs.2012.24047>
- Hirschmann, J.R. 1975. Solar distillation in Chile. *Desalination* 17. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84078-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84078-3)
- Instituto Nacional de Estadística. 2007. VII Censo nacional agropecuario y forestal. Resultados finales. Disponible en: <https://www.inec.gov.cl/censoagropecuario/resultados-finales/graficas-nacionales>.
- Jil, A. 2021. Evaluación técnica-económica de la implementación de sistemas de membranas como tratamiento terciario en la planata de tratamiento de La Farfana para la reutilización de los efluentes (Tesis de Pregrado). Universidad Federico Santa María, Valparaíso (Chile).
- Jones, E.R., Van Vliet, M.T.H., Qadir, M., Bierkens, M.F.P. 2021. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data* 13. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- LeBoeuf, R., de la Jara, E. 2014. Quantitative goals for large-scale fog collection projects as a sustainable freshwater resource in northern Chile. *Water International* 39. <https://doi.org/10.1080/02508060.2014.923257>
- Leverenz, H.L., Tchobanoglous, G., Asano, T. 2011. Direct potable reuse: A future imperative. *Journal of Water Reuse and Desalination* 1. <https://doi.org/10.2166/wrd.2011.000>

- Marticorena J. 2020. Consumo de agua promedio por persona en Chile supera la media europea, aunque está por debajo de la de Estados Unidos. Disponible en: https://www.litoralpress.cl/sitio/Prensa_Texto?LPKey=wM5Yj/hwxDJgsDI5N2QyOjtybXR1%C3%9CRG VgT5AXnFjuj%C3%96#:~:text=%E2%80%9Cseg%C3%BA%20el%20%C3%BA%20informe%20de,la%20red%2C%20entre%20otras%20razones.
- Ministerio de Obras Públicas. 2019. Mesa Nacional Del Agua: Primer Informe. Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- Mollahosseini, A., Abdelrasoul, A. 2020. Introductory Chapter: An Overview of Recent Advances in Membrane Technologies, in: *Advances in Membrane Technologies*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89552>
- Nurjanah, I., Chang, T.-T., You, S.-J., Huang, C.-Y., Sean, W.-Y. 2024. Reverse osmosis integrated with renewable energy as sustainable technology: A review. *Desalination* 581, 117590. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117590>
- País Circular. 2024. Plantas desalinizadoras en Chile: radiografía a la situación actual y la proyección esperada. Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/agua/plantas-desalinizadoras-en-chile-radio-grafia-a-la-situacion-actual-y-la-proyeccion-esperada/>
- Procházková, M., Touš, M., Horňák, D., Miklas, V., Vondra, M., Máša, V. 2023. Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. *Journal of Cleaner Production* 426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139037>
- Qadir, M., Jiménez, G.C., Farnum, R.L., Dodson, L.L., Smakhtin, V. 2018. Fog water collection: Challenges beyond technology. *Water* (Switzerland) 10. <https://doi.org/10.3390/w10040372>
- Qin, J.J., Kekre, K.A., Tao, G., Oo, M.H., Wai, M.N., Lee, T.C., Viswanath, B., Seah, H. 2006. New option of MBR-RO process for production of NEWater from domestic sewage. *Journal of Membrane Science* 272. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.07.023>

- Ritter, A., Regalado, C.M., Aschan, G. 2008. Fog water collection in a subtropical Elfin Laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): A combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model. *Journal of Hydrometeorology* 9. <https://doi.org/10.1175/2008JHMg92.1>
- Roccaro, P. 2018. Treatment processes for municipal wastewater reclamation: The challenges of emerging contaminants and direct potable reuse. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 2. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.02.003>
- Salehi, A.A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., Asadollahzadeh, M. 2020. A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109627>
- Straub, D.J., Hutchings, J.W., Herckes, P. 2012. Measurements of fog composition at a rural site. *Atmospheric Environment* 47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.014>
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. 2024. Tarifas. Disponible en: <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6385.html>
- Tram VO, P., Ngo, H.H., Guo, W., Zhou, J.L., Nguyen, P.D., Listowski, A., Wang, X.C. 2014. A mini-review on the impacts of climate change on wastewater reclamation and reuse. *Science of the Total Environment* 494-495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.090>
- Verstraete, W., Van de Caveye, P., Diamantis, V. 2009. Maximum use of resources present in domestic "used water." *Bioresource Technology* 100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047>
- Yang, J., Monnot, M., Ercolei, L., Moulin, P. 2020. Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: State-of-the-art and performance analysis. *Membranes* 10. <https://doi.org/10.3390/membranes10060131>



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE A PARTIR DE RECURSOS HÍDRICOS NO CONVENCIONALES: AGUA DE MAR, AGUAS SERVIDAS TRATADAS, HUMEDAD DEL AIRE Y NIEBLA



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

