

## Técnicas y métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales

En este trabajo se plantea un esquema general de tratamiento de aguas residuales, que consta de las siguientes etapas: pretratamiento, tratamientos primario, secundario y terciario, y desinfección. Cada una de dichas etapas consta de diferentes técnicas y métodos específicos (físicos, químicos y biológicos) para cada necesidad de tratamiento según el tipo de agua residual.

Los objetivos de cada etapa son:

- Pretratamiento: elimina materiales mayores que provocan problemas de mantenimiento y funcionamiento de la Planta de Tratamiento.
- Tratamiento Primario: remueve productos orgánicos e inorgánicos mediante procesos físico-químicos.
- Tratamiento Secundario: elimina materia orgánica, principalmente disuelta, mediante procesos biológicos.
- Tratamiento Terciario: remueve materia inorgánica y recalcitrantes.
- Desinfección: elimina microorganismos mediante procesos físico-químicos.

Finalmente, se presenta el método de tratamiento de aguas residuales (domésticas y municipales) más apropiado para países en vías de desarrollo, como son las Lagunas de Estabilización (LE), que tienen un bajo costo, requieren poco mantenimiento, poseen la capacidad de asimilar grandes variaciones en el flujo de aguas residuales y muestran un buen nivel de eficiencia, generando un efluente altamente purificado.

Está enfocada en apoyar preferentemente el trabajo de las Comisiones Legislativas de ambas Cámaras, con especial atención al seguimiento de los proyectos de ley. Con lo cual se pretende contribuir a la certeza legislativa y a disminuir la brecha de disponibilidad de información y análisis entre Legislativo y Ejecutivo.

### Contacto

E-mail:

[atencionparlamentarios@bcn.cl](mailto:atencionparlamentarios@bcn.cl)

Tel.: (56) 32-226 3168 (Valpo.)

El presente documento responde a una solicitud parlamentaria del Congreso Nacional, conforme a sus orientaciones y particulares requerimientos. Por consiguiente, tanto la temática abordada como sus contenidos están determinados por los parámetros de análisis acordados y por el plazo de entrega convenido. Su objeto fundamental no es el debate académico, si bien su elaboración observó los criterios de validez, confiabilidad, neutralidad y oportunidad en la entrega.

### Eduardo Baeza Gómez

Es Ingeniero Agrónomo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, con formación internacional en temas de Agroecología, Desarrollo Sustentable y Políticas Económicas para el Medio Ambiente. Consultor nacional e internacional en sustentabilidad agropecuaria. Áreas de interés: Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable.

E-mail: [ebaeza@bcn.cl](mailto:ebaeza@bcn.cl)

Tel.: (56) 32 226 3902

## Introducción

El presente informe se enfoca en los tratamientos a los cuales son sometidas diferentes tipos de aguas residuales para obtener agua de pureza razonable, principalmente para el consumo humano. Se describen los principales métodos y técnicas usadas a nivel global como parte de los tratamientos.

En la elaboración de este documento se recurrió a fuentes especializadas sobre la materia, en particular en lo referido a saneamiento de aguas, tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) e Instituciones de Investigación en el tema, entre otros.

## Definiciones previas

La Ley 21.075 de 2018, del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises, en su Artículo 2, define:

a) "Aguas grises": aguas servidas domésticas residuales provenientes de las tinajas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras.

b) "Aguas grises tratadas": aquellas que se han sometido a los procesos de tratamiento requeridos para el uso previsto.

c) "Aguas negras": aguas residuales que contienen excretas.

d) "Aguas residuales": aquellas que se descargan después de haber sido utilizadas en un proceso o producidas por éste, y que no tienen ningún valor inmediato para dicho proceso.

e) "Aguas servidas domésticas": aguas residuales que contienen los desechos de una edificación, compuestas por aguas grises y aguas negras.

## Tratamiento de aguas residuales urbanas, industriales y agropecuarias

El Doctor Rolando Chamy<sup>1</sup> (comunicación personal, 2018), plantea y describe un esquema general del tratamiento de aguas residuales (Figura 1) y define los principales tratamientos a los que son sometidos este tipo de efluentes contaminados para obtener agua de pureza razonable. Los tratamientos biológicos involucrados en cada proceso pueden ser anaerobios<sup>2</sup>, aerobios<sup>3</sup> o mixtos. En resumen, estos son:

- a) Pretratamiento: permite eliminar materia que provoca problemas de mantenimiento y funcionamiento de la Planta de Tratamiento, tales como ramas, piedras, arena, aceites y grasas, entre otros.
- b) Tratamiento Primario: elimina productos orgánicos e inorgánicos mediante procesos físico-químicos.
- c) Tratamiento Secundario: elimina cargas orgánicas, principalmente disueltas, mediante procesos biológicos.
- d) Tratamiento Terciario: elimina materia inorgánica y materiales recalcitrantes<sup>4</sup> (N, P, otros).

<sup>1</sup> Ingeniero Civil Bioquímico. Doctor en Cs. Químicas. Director Núcleo Biotecnología PUCV-Chile. Vice Presidente Técnico de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS).

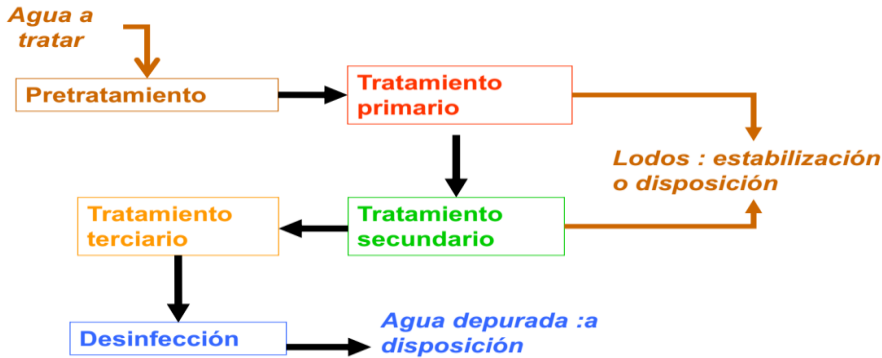
<sup>2</sup> Sin presencia de Oxígeno

<sup>3</sup> En presencia de Oxígeno

<sup>4</sup> Contaminantes que resisten cualquier mecanismo de degradación biológico o químico, debido a su estabilidad química.

e) Sanitización o Desinfección: elimina microorganismos mediante procesos físico-químicos.

Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Elaborado por Dr. Rolando Chamy

En cuanto al nivel de remoción de algunos de los contaminantes relevantes de un agua residual, la Tabla 1 muestra resultados medios en esta materia. Se aprecia el caso particular de la remoción de: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)<sup>5</sup>, Demanda Química de Oxígeno (DQO)<sup>6</sup>, Sólidos en Suspensión (SS), Nitrógeno (N) y Fósforo (P).

Tabla 1. Nivel de remoción (%) de contaminantes principales de las aguas residuales por cada tratamiento

	<i>Tratamiento (% remoción)</i>		
	<i>Primario</i>	<i>secundario</i>	<i>terciario</i>
<b>DBO</b>	<b>35</b>	<b>90</b>	<b>99.99</b>
<b>DQO</b>	<b>30</b>	<b>80</b>	<b>99.8</b>
<b>SS</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	
<b>N</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>99.5</b>
<b>P</b>	<b>10</b>	<b>60</b>	<b>variable</b>

Fuente: Elaborado por Dr. Rolando Chamy

<sup>5</sup> Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar totalmente la materia orgánica biodegradable que se encuentre en la muestra de agua.

<sup>6</sup> Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente (generalmente con permanganato potásico o con dicromato potásico en medio ácido) toda la materia orgánica que se pueda encontrar presente en la muestra de agua.

Lagunas de Estabilización:

De acuerdo a Sánchez y Matsumoto (2012), las Lagunas de Estabilización (LE) son usualmente el método más apropiado de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico y municipal en países en vías de desarrollo, ya que son de bajo costo, requieren poco mantenimiento, poseen la capacidad de asimilar grandes variaciones en el flujo de aguas residuales y ofrecen un buen nivel de eficiencia, generando un efluente altamente purificado, por medio de mecanismos naturales y altamente sostenibles.

El tratamiento se basa en la interacción de biomasa (algas, bacterias, protozoarios, entre otros) en grandes reservorios (lagunas), dentro de los cuales las aguas residuales fluyen, saliendo después de un período de retención definido, contando únicamente con los procesos naturales de purificación biológica que ocurren en un cuerpo natural de agua. Para su operación no se requiere ninguna energía externa, salvo la luz solar. Se definen como una única serie de lagunas anaerobias, facultativas y de maduración, o varias series de unidades en paralelo. Se clasifican por su estado aeróbico y la fuente del oxígeno para la asimilación bacteriana de la materia orgánica contenida en las aguas residuales; al respecto los tipos de lagunas son: aerobias, facultativas<sup>7</sup>, de mezcla parcial, aireadas y anaerobias. La Tabla 2 muestra las diferencias de cada tipo de laguna en cuanto a profundidad, tiempo de retención hidráulica (TRH)<sup>8</sup>, carga orgánica, DBO, concentración de algas y sólidos en suspensión totales (SST).

Las condiciones hidráulicas y biológicas en este tipo de tratamiento (LE) pueden ser afectadas por una serie de factores físicos, tales como el área superficial requerida, la profundidad y el TRH; o químicos, como el pH, la alcalinidad y las sustancias tóxicas presentes (Sánchez y Matsumoto, 2012).

Tabla 2. Parámetros característicos de cada tipo de Laguna de Estabilización.

	Aireada	Aerobia	Facultativa	Anaerobia
Profundidad (m)	1.8 - 6.0	0.3 - 0.5	1.2 - 2.4	2.4 - 4.8
TRH (días)	3 - 10	4 - 10	5 - 30	20 - 50
Carga Orgánica (Kg DBO/Há. x día)		17 - 180	56 - 200	225 - 560
$\eta$ DBO (%) <sup>9</sup>	80 - 95	60 - 95	80 - 95	50 - 85
Concentración Algas (mg/L)	0	5 - 260	5 - 20	0 - 5
SST efluente (mg/L)*	80 - 250	10 - 300	40 - 60	80 - 160

\*incluye algas, microorganismos y sólidos suspendidos residuales.

Fuente: Elaborado por Dr. Rolando Chamy

<sup>7</sup> lagunas que operan en su estrato superior como lagunas aeróbicas y en su estrato inferior como lagunas anaerobias, y en el estrato intermedio, con la presencia de bacterias facultativas (que usan o no el oxígeno), se crea un estrato particular llamada zona facultativa.

<sup>8</sup> Tiempo que el agua residual permanece en un determinado recipiente.

<sup>9</sup> Rendimiento de eliminación de materia orgánica.

## Tratamientos para aguas grises

De acuerdo a los trabajos de Pacific Institute (2010) y Harris (2014), las aguas grises -por su origen residencial- poseen un escaso nivel de impurezas o contaminantes en comparación con otros tipos de aguas residuales. Por lo anterior es que, a nivel comparado, se han presentado algunas alternativas para su tratamiento después de recolectada, lo cual se presenta en la Tabla 3 a continuación:

Tabla 3. Tecnologías para el tratamiento de aguas grises más comunes a nivel global.

Técnica de Tratamiento	Descripción	Ventajas	Desventajas
Desinfección	Cloro, Ozono o Luz Ultravioleta pueden ser usados para desinfectar aguas grises	Altamente efectivo para eliminar bacterias si es apropiadamente diseñado y operado. Bajo requerimiento operativo.	Cloro y Ozono pueden crear subproductos tóxicos. Ozono y Luz Ultravioleta pueden ser afectados adversamente por variaciones en el contenido orgánico de las aguas grises.
Filtro de Carbón Activado	El Carbón Activado ha sido tratado con oxígeno para abrir millones de microporos entre los átomos de carbono. Esto da como resultado una gran superficie porosa con áreas de 300-2000 m <sup>2</sup> /gr. Estos filtros son ampliamente usados para adsorber olores o sustancias coloreadas desde gases o líquidos.	Operación simple. El Carbón Activado es particularmente bueno para atrapar químicos orgánicos, así como compuestos inorgánicos como el cloro.	Alto requerimiento de capital. Muchos otros químicos no son atrapados por el Carbón Activado (sodio, nitratos y otros), es decir, un filtro de Carbón Activado sólo removerá ciertas impurezas. Cuando toda la porosidad se llena o satura, el filtro deja de funcionar.
Filtro de Arena	Camas de arena o en algunos casos corteza gruesa o cobertura (mantillo) que atrapa y adsorbe los contaminantes cuando los flujos de aguas grises los atraviesan.	Operación simple, baja mantención y bajos costos de operación.	Alto costo de inversión. Reduce patógenos, pero no los elimina. Se atasca e inunda cuando es sobrecargado.
Tratamiento Biológico Aeróbico	El aire es bombeado para transferir oxígeno a las aguas grises. Las bacterias presentes consumen el oxígeno disuelto y digieren los contaminantes orgánicos, reduciendo dichos contaminantes.	Alto grado de flexibilidad en la operación para acomodar o estandarizar las aguas grises de calidad y en cantidades variables. Permite que el agua tratada sea almacenada indefinidamente.	Altos costos de inversión y operación. Requerimientos operacionales complejos. No remueve todos los patógenos.

Bio-reactor de Membrana	Usa en conjunto el tratamiento biológico aeróbico con la filtración para propiciar el consumo de contaminantes orgánicos y la filtración de todos los patógenos.	Altamente efectivo cuando es diseñado y operado apropiadamente. Alto grado de flexibilidad en la operación para acomodar o estandarizar las aguas grises (calidad y cantidad). Permite que el agua tratada sea almacenada indefinidamente.	Altos costos de inversión y operación. Requerimientos operacionales complejos.
-------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Pacific Institute (2010), adaptado de NovaTec (2004).

### Métodos de tratamiento de aguas para consumo humano

De acuerdo a las Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano, de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en su última edición del año 2018, los principales métodos de tratamiento de aguas para el consumo humano se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Métodos de Tratamiento

Método de Tratamiento	Descripción
Desinfección por Cloración	La cloración se emplea principalmente para la desinfección microbiana. Sin embargo, el cloro también actúa como oxidante y puede eliminar o ayudar a eliminar algunas sustancias químicas y convertir, por ejemplo, la descomposición de plaguicidas fácilmente oxidables; puede oxidar elementos disueltos (ejm. Manganeseo) para formar productos insolubles que se pueden eliminar mediante la filtración posterior y puede oxidar especies disueltas a formas que se pueden remover más fácilmente (ejm.: pasar de arsenito a arseniato).
Desinfección por Ozonización	El ozono es un oxidante potente que tiene muchos usos en el tratamiento del agua, incluida la oxidación de compuestos químicos orgánicos. El ozono puede ser utilizado como un desinfectante primario. El ozono reacciona con las sustancias orgánicas naturales para aumentar su biodegradación, medida en términos de carbono orgánico asimilable. Para evitar el crecimiento bacteriano indeseable en la distribución, la ozonización se complementa normalmente con un tratamiento posterior, como la filtración biológica o el carbón activado granular (CAG), para eliminar compuestos orgánicos biodegradables, seguido de la aplicación de una concentración residual de cloro, ya que el ozono no produce un efecto desinfectante residual. El ozono también es eficaz para degradar una amplia gama de plaguicidas y otras sustancias orgánicas.
Otros procesos de desinfección	Otros métodos de desinfección incluyen la cloraminación, el uso de dióxido de cloro y la radiación UV, así como técnicas de desinfección alternativas que se pueden usar en aplicaciones de menor escala a nivel de agua domiciliaria, tales como el bromo y yodo, que muestran buenas posibilidades para ampliar su uso. El bromo y el yodo son halógenos, como el cloro, y son biocidas conocidos.

Filtración	Usada para remover el material particulado de las aguas crudas mediante filtros rápidos por gravedad, horizontales, a presión o filtros lentos de arena. La filtración lenta de arena es esencialmente un proceso biológico, mientras que los otros son procesos de tratamiento físico. Los filtros rápidos por gravedad, los horizontales y los de presión se puede utilizar para la filtración del agua cruda, sin pretratamiento. Usualmente, los filtros rápidos por gravedad y los de presión se utilizan para filtrar el agua que ha sido tratada previamente por coagulación y sedimentación. Un procedimiento alternativo es la filtración directa, en la que se añade un coagulante al agua, que luego pasa directamente por el filtro donde se elimina el floculo precipitado.
Aireación	Se usa para eliminar gases y compuestos volátiles por arrastre con aire. La transferencia por lo general se obtiene mediante una cascada simple o la difusión de aire en el agua, sin necesidad de un equipo sofisticado. La remoción de gases o compuestos volátiles, sin embargo, puede requerir una planta especializada que proporcione un alto grado de transferencia de masa, de la fase líquida a la fase gaseosa.
Coagulación Química	Se realiza usualmente con sales de aluminio o hierro como coagulantes. Es adecuada para la eliminación de partículas que contienen microorganismos, ciertos metales pesados y sustancias químicas orgánicas de baja solubilidad, como ciertos plaguicidas organoclorados. Para las otras sustancias químicas orgánicas, la coagulación suele ser ineficaz, excepto cuando la sustancia se integra al material húmico (coloide) o está adsorbida en las partículas. El floculo o coágulo obtenido debe ser posteriormente removido por procesos de sedimentación o flotación y filtración.
Adsorción por Carbón Activado	El carbón activado se utiliza para la eliminación de plaguicidas y otros productos químicos orgánicos, compuestos que alteran el sabor y olor del agua, toxinas de cianobacterias y carbón orgánico total. Se formula en polvo (CAP) o en forma granular (CAG) y la elección entre ambos dependerá de la eficacia en función del costo, la frecuencia y la dosis requerida. El CAP, en general, se preferirá en el caso de contaminación estacional o intermitente o donde se requieren tasas de dosificación bajas.
Intercambio Iónico	El intercambio iónico es un proceso en el que se intercambian iones con carga similar entre una fase acuosa y una fase de resina sólida. Se puede utilizar el intercambio catiónico (entre iones con carga positiva) para eliminar ciertos metales pesados. Por su parte, las aplicaciones potenciales de las resinas aniónicas (para iones con carga negativa), permitirían la eliminación de nitratos, arsénico y selenio.
Procesos de Membrana	Los procesos de membrana más reconocidos para el tratamiento del agua son la ósmosis inversa, ultrafiltración, microfiltración y nanofiltración. Estos procesos tradicionalmente se han aplicado a la producción de agua para fines industriales o farmacéuticos, y ahora se están aplicando al tratamiento de agua de consumo humano.
Otros procesos	Se destacan:

	<ul style="list-style-type: none"><li>- Procesos que generan radicales hidroxilo (oxidación avanzada), pueden ser eficaces para eliminar sustancias químicas que son difíciles de tratar con otros métodos.</li><li>- El ablandamiento por precipitación (adición de cal, además de carbonato de sodio o hidróxido de sodio para precipitar la dureza con pH alto);</li><li>- Desnitrificación biológica para remover nitratos de aguas superficiales;</li><li>- Nitrificación biológica para remover amoníaco de aguas superficiales;</li><li>- Alúmina Activada (u otros adsorbentes) para aplicaciones especializadas, como la eliminación de fluoruro y arsénico.</li></ul>
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: OMS

## Referencias

Biblioteca del Congreso Nacional BCN (2014). La reutilización del agua gris en el Derecho comparado (Informe BCN). Elaborado por Pedro Harris M. (Noviembre de 2014).

Ley Chile. Ley 21.075: regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises, Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: <http://bcn.cl/25szt> (Julio de 2018)

OMS (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano, Cuarta Edición. Disponible en: <http://bcn.cl/25sz9> (Julio de 2018)

Pacific Institute (2010). Overview of Greywater Reuse: The Potential of Greywater Systems to Aid Sustainable Water Management. Disponible en: <http://bcn.cl/215mq> (Julio de 2018).

Sánchez, I. y Matsumoto, T. (2012). Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de ILHA Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. Ingeniería y Desarrollo, vol. 30, núm. 2, julio-diciembre, 2012, pp. 199-222. Disponible en: <http://bcn.cl/25tj2> (Julio de 2018)