



Universidad de Concepción

# SUSTENTABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS UNA MIRADA DESDE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Yannay Casas / Yenifer González / Gloria Gómez  
Eduardo Holzapfel / Nicolás Arroyo / Gladys Vidal

Serie Comunicacional CRHIAM

## **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:**

Sustentabilidad de los sistemas de tratamiento de aguas servidas.

Una mirada desde el análisis de ciclo de vida

Yannay Casas, Yenifer González, Gloria Gómez,

Eduardo Holzapfel, Nicolás Arroyo y Gladys Vidal.

Septiembre 2022.

### **Agradecimientos:**

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

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

[www.crhiam.cl](http://www.crhiam.cl)



Universidad de Concepción

# **SUSTENTABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS UNA MIRADA DESDE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

Yannay Casas / Yenifer González / Gloria Gómez  
Eduardo Holzapfel / Nicolás Arroyo / Gladys Vidal

## **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



### **Yannay Casas**

Doctora en Ciencias Biológicas Aplicadas,  
Universidad de Gante, Bélgica.  
Profesora Asociada, Facultad de Ciencias  
Ambientales, Universidad de Concepción.  
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental  
(GIBA-UDEC).  
Investigadora Asociada CRHIAM.

---

● ●



### **Yenifer González**

Ingeniera Ambiental.  
Estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales  
con mención en Sistemas Acuáticos Continentales,  
Universidad de Concepción.  
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental  
(GIBA-UDEC).

---

● ●



### **Gloria Gómez**

Bioingeniera.  
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental  
(GIBA-UDEC).  
Colaboradora CRHIAM.

---

● ●



### **Eduardo Holzapfel**

PhD en Ingeniería,  
Universidad de California Davis, Estados Unidos.  
Profesor Titular/Emérito,  
Facultad de Ingeniería Agrícola,  
Universidad de Concepción.  
Investigador Asociado CRHIAM.

## DATOS DE INVESTIGADORES



### **Nicolás Arroyo**

Ingeniero Ambiental.  
Magíster en Ingeniería Industrial,  
Universidad Andrés Bello.  
Jefe control de procesos operacionales  
ESSBIO S.A. y NUEVO SUR.



### **Gladys Vidal**

Doctor en Ciencias Químicas,  
Programa en Biotecnología Ambiental,  
Universidad Santiago de Compostela, España.  
Profesora Titular Facultad de Ciencias Ambientales,  
Universidad de Concepción.  
Directora CRHIAM.

## RESUMEN

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite la evaluación de los potenciales impactos ambientales de procesos y productos a lo largo de su existencia, por tanto, es esencial en la evaluación de estudios orientados a la sustentabilidad. Particularmente el ACV, ha motivado a los sistemas de tratamiento aguas servidas a innovar y mejorar sus servicios, dando lugar a nuevos productos en el mercado para la conversión de residuos en recursos fomentando la economía circular. Esta herramienta también ha permitido identificar estrategias de optimización e innovación ambientalmente atractivas en comparación con prácticas convencionales. Además, permite visualizar el potencial del reúso de las aguas para diferentes fines usando diferentes tratamientos terciarios. Esta alternativa se convierte en una gran oportunidad frente a los escenarios de escasez hídrica asociados a los efectos del cambio climático.

Esta Serie Comunicacional CRHIAM entrega una revisión general sobre las potencialidades y desafíos de la aplicación del ACV, con énfasis en los sistemas de tratamiento de aguas servidas.



## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento de agua servidas constituyen una parte esencial dentro del ciclo antrópico del agua, y su objetivo es disminuir la carga de contaminantes emitidos hacia los ecosistemas acuáticos receptores, proveniente de los residuos líquidos urbanos o aguas servidas. Dichos sistemas no están exentos de generar impactos ambientales, principalmente asociados al consumo de energía y recursos, generación de residuos y emisiones a lo largo de toda su cadena de tratamiento. Sin embargo, frente a los nuevos paradigmas de la sustentabilidad, tales como la economía circular, las plantas de tratamiento de aguas servidas se convierten en una fuente interesante de vectores energéticos y nutrientes. Al mismo tiempo, la creciente presión sobre el recurso agua y los escenarios actuales de escasez hídrica, han motivado la búsqueda de nuevas fuentes de agua, donde la reutilización de las aguas servidas constituye una alternativa prometedora.

Sin embargo, no resulta sencillo identificar cuál o cuáles de las estrategias innovadoras planteadas es la más sustentable. Uno de los pilares que considera la sustentabilidad son los aspectos ambientales, donde la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) juega un papel fundamental en determinar los potenciales impactos ambientales de un proceso, servicio o actividad, aportando información valiosa a los procesos de tomas de decisiones.

---

## POTENCIALIDADES Y DESAFÍOS DE LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

### ¿Qué es el ACV?

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que permite la evaluación de los potenciales impactos ambientales de procesos y productos a lo largo de su ciclo de vida considerando desde la extracción de materias primas, fabricación, transporte, uso, hasta la disposición final. Esta metodología se encuentra estandarizada por la Organización Internacional para la Normalización (Siglas en Ingles ISO), específicamente por la serie ISO 14.040 (2006) y la ISO 14.044 (2006):

- ISO 14.040 (2006): define los principios y marco metodológico de un Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).
- ISO 14.044 (2006): se especifican los requerimientos y los pasos a considerar en cada fase definida en el ACV (International Organization for Standardization, 2006) (ISO 14044, 2006).

La metodología del ACV consta de 4 fases según se ilustra en la Figura 1. A continuación se describe brevemente en que consiste cada fase:

1. **Definición del objetivo y los alcances del estudio:** Define el objetivo del estudio, los alcances del sistema, unidad funcional que será la base de la evaluación, así como la regla de distribución de cargas ambientales para procesos donde se generan más de un producto.
2. **Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV):** Se recopilan los datos correspondientes a las entradas y salidas tanto desde el punto de vista másico como energéticos para todas las etapas del proceso, expresándose en función de la unidad funcional.
3. **Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV):** correlaciona las emisiones (aire, suelo y agua), los recursos (minerales y combustibles fósiles) y los potenciales impactos que pudieran generar al ecosistema, salud humana o recursos. Ejemplos de categorías de impactos son acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono, entre otros. Este procedimiento se realiza usando diferentes métodos de evaluación de impacto (p. ej., Eco-Indicator 99, Método EPD, CML, IMPACT 2002+, ReCiPe, TRACI I, BEES, entre otros), que también se incluyen en los diversos softwares de ACV (SimaPro, Umberto, OpenLCA, entre otros).
4. **Interpretación:** Los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo con el objetivo y alcance establecidos previamente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se identifican los asuntos más significativos, evaluación de la sensibilidad de coherencia y la verificación de los análisis de integridad, y terminando con la construcción de las conclusiones, limitaciones y recomendaciones.



## 1 Objetivos y Alcances

- Objetivo del estudio.
- Alcances del sistema.
- Unidad funcional.
- Regla de distribución de cargas ambientales.

## 2 Análisis de Inventario

- Recopilación de datos:
- Entradas y salidas técnicas de todos los procesos.
- Emisiones (al aire, agua y suelo).
- Uso de recursos (tierra, agua, fósiles, metales).

| Contaminante | Nivel (aproximado) |
|--------------|--------------------|
| CO2          | 15                 |
| NOx          | 45                 |
| PM2.5        | 58                 |
| PM10         | 90                 |

## 3 Evaluación de Impacto

- Correlaciona:
  - Emisiones (aire, suelo y agua).
  - Recursos (minerales y combustibles fósiles).

↓

- Potenciales impactos que pudieran generar al ecosistema, salud humana o recursos.

## 4 Interpretación

- Análisis de los resultados e identificar los asuntos más significativos.
- Evaluación de la sensibilidad de coherencia.
- Verificación de los análisis de integridad.
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

Figura 1.

Fases en la aplicación de la metodología de ACV.  
Fuente: Elaboración propia.

Las fases del ACV no siguen estrictamente una sola secuencia. Este es un procedimiento iterativo en el que las iteraciones posteriores pueden alcanzar niveles crecientes de detalle en el análisis; es decir, partir desde un ACV conceptual a uno detallado; o redefinir los aspectos metodológicos que fueron definidos en las primeras fases impulsadas por los resultados de la última fase.

### ¿Cuáles son las potencialidades del ACV?

Dentro de las potencialidades que ofrece la herramienta de ACV, se pueden mencionar las siguientes (JRC, 2010):

- Provee un perfil ambiental completo de un determinado producto, lo que permite tener resultados de diferentes impactos ambientales a la vez. Esto hace que los resultados sean mucho más completos que otras herramientas de gestión ambiental.
- Realizar comparaciones entre productos que tengan la misma funcionalidad, seleccionando la alternativa con menores impactos ambientales.
- El ACV puede resaltar *hotspots* en múltiples categorías de impacto e identificar el posible desplazamiento de la carga ambiental o compensaciones a lo largo del ciclo de vida; es decir, situaciones en las cuales la decisión de modificar una etapa para disminuir su impacto ambiental puede generar incrementos en los impactos ambientales de otras etapas del ciclo de vida.
- Mejorar la cadena de producción en todas sus fases de ciclo de vida en lugar de partes de ellos.
- Identificar áreas de mejoras en aquellas etapas críticas dentro de la cadena de valor de un determinado producto. Por lo tanto, también permite evaluar los beneficios de alternativas de mejoras en cualquier producto.
- Permite, al mismo tiempo, tomar decisiones pensando en el largo plazo; por ejemplo, considerando cuáles serían los potenciales impactos al final de vida de un producto.
- Provee información ambiental base para certificaciones ambientales (ejemplo: carbono neutral, certificaciones de edificaciones sustentables (LEED) y el desarrollo de ecoetiquetas ambientales).
- El uso del ACV fomenta la gestión ambiental preventiva y proactiva en lugar de un enfoque reactivo al final del proceso; es decir, busca reducir el impacto ambiental desde la fase de conceptualización y diseño de un producto.

- Permite orientar las políticas de sustentabilidad y generar innovación en el desarrollo de los productos a lo largo de su ciclo de vida.
- Se puede complementar con otras herramientas de gestión ambiental, tales como análisis de riesgo, eficiencia energética, análisis de ciclo de vida económico, entre otras.
- El ACV complementa las filosofías de Economía Circular. Explica los cambios a lo largo del ciclo de vida del producto cuando se progresa a un modelo circular y es capaz de reconocer las limitaciones del modelo circular y explorar nuevos enfoques alternativos.
- Puede proporcionar información ambiental relevante para la toma de decisiones, necesario para avanzar en el cumplimiento de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

### ¿Cuáles son las limitaciones que presenta el ACV?

Actualmente, el estándar ISO 14044 es ampliamente aceptado y utilizado para estudios de ACV; sin embargo, algunos aspectos metodológicos a menudo se consideran demasiado restrictivos y complejos durante su implementación.

Uno de los desafíos más importantes para un uso más amplio del ACV es desarrollar bases de datos de inventario del ciclo de vida regional, particularmente para las regiones de América Latina y el Caribe.

Actualmente, existen bases de datos operativas para México (81 datasets Mexicanuh) y clústers de datasets para Brasil y Chile (Sonnemann *et al.*, 2016; Valdivia *et al.*, 2017). En particular para Chile, la base de datos LCA denominada Ecobase fue desarrollada por Fundación Chile (Valdivia *et al.*, 2015). Esta base de datos se enfoca principalmente en productos alimenticios de exportación y materiales de construcción producidos durante 2015, lo que involucró 147 conjuntos de datos (Sonnemann *et al.*, 2016). Sin embargo, el uso de la base de datos LCA chilena es limitado debido a que no está disponible gratuitamente. La Tabla 1 proporciona un resumen de los principales desafíos por cada fase que compone el ACV.

**Tabla 1.**

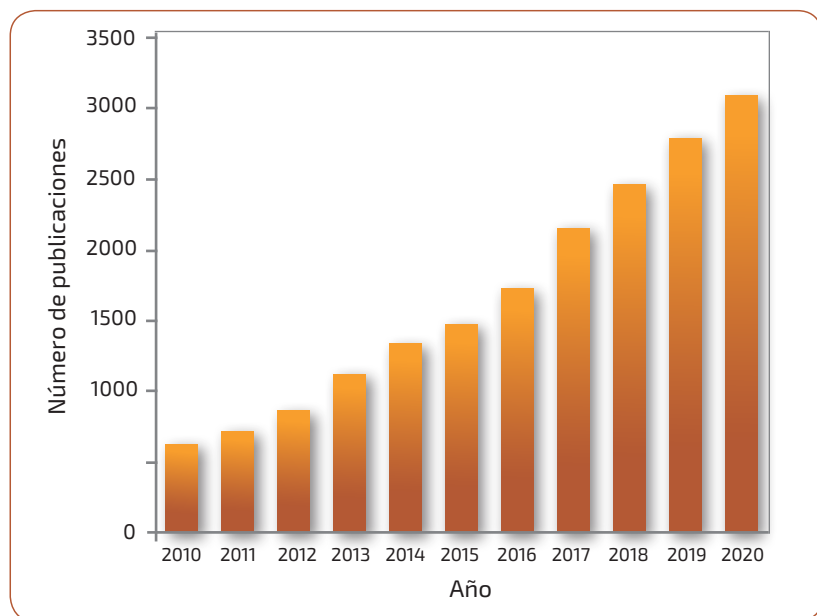
Desafíos generales en la implementación del ACV. Basado en (Guinée *et al.*, 2011; Reap *et al.*, 2008; Zamagni *et al.*, 2008).

| 1. Definición del objetivo y los alcances del estudio  | 2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• La definición de la unidad funcional para la evaluación del ciclo de vida es un desafío para los principiantes.</li> <li>• Los límites del sistema de productos son difíciles de definir, ya que es necesario decidir cuánto expandir el alcance del estudio para asegurarse de obtener un ACV completo; sin aumentar innecesariamente la complejidad del análisis.</li> <li>• Algunas simplificaciones del sistema suelen ser demasiado restrictivas, en particular para su aplicación a mesoescala (p. ej., sectores industriales) y macroescala (p. ej., sistemas tecnológicos complejos). Esto podría conducir a una evaluación parcial y un desplazamiento de los impactos ambientales debido a la implementación de medidas con impactos fuera del sistema.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe un acuerdo claro sobre el enfoque de asignación de impactos ambientales más apropiado para diferentes casos.</li> <li>• La variable tiempo no se considera en los inventarios de ciclo de vida; básicamente, los actuales inventarios se realizan de forma estática, lo que limita las proyecciones futuras.</li> <li>• Aún se necesita más investigación sobre la confiabilidad e incertidumbre de los datos, en particular para el análisis de entradas y salidas (<i>Input-Output</i>).</li> <li>• Hay una falta general de disponibilidad y calidad de datos específicos de la región, específicamente para los países no desarrollados.</li> </ul> |
| 3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)   | 4. Interpretación  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es bastante difícil para los no expertos elegir el método de evaluación de impacto y especialmente interpretar los impactos debido a una variedad de enfoques de métodos (puntos intermedios/puntos finales). La armonización de los dos enfoques podría resolver este problema.</li> <li>• Se requiere diferenciación espacial y asignación geográfica para varias categorías de impacto (por ejemplo, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, entre otros). Esto aún no se puede representar adecuadamente con los métodos actuales.</li> <li>• Se necesitan nuevos métodos de caracterización y categorías de impacto. Por ejemplo: evaluación de riesgos, contaminación acústica, etc.</li> <li>• También se debe avanzar en la diferenciación de conjuntos de datos de normalización a escala regional.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de la calidad de los datos y análisis de incertidumbre.</li> <li>• Directrices más completas para definir la incertidumbre en los datos de inventario y los modelos de evaluación de impacto.</li> </ul>   |

## ÁREAS DE APLICACIÓN DEL ACV

Para conocer las áreas de aplicación del ACV, se realizó una búsqueda desde ISI web of knowledge, sitio web que proporciona acceso basado en suscripción a múltiples bases de datos ISI (Institute for Scientific Information).

La búsqueda se realizó usando las palabras claves "life cycle assessment" o "life cycle approach" y solamente se seleccionaron los artículos científicos, excluyendo libros, capítulos de libros u otros reportes para un periodo entre 2010 y 2020. La búsqueda notificó más de 17.914 artículos científicos y se evidencia un creciente interés en la aplicación de la herramienta de ACV desde 2010 según se presenta en la Figura 2.

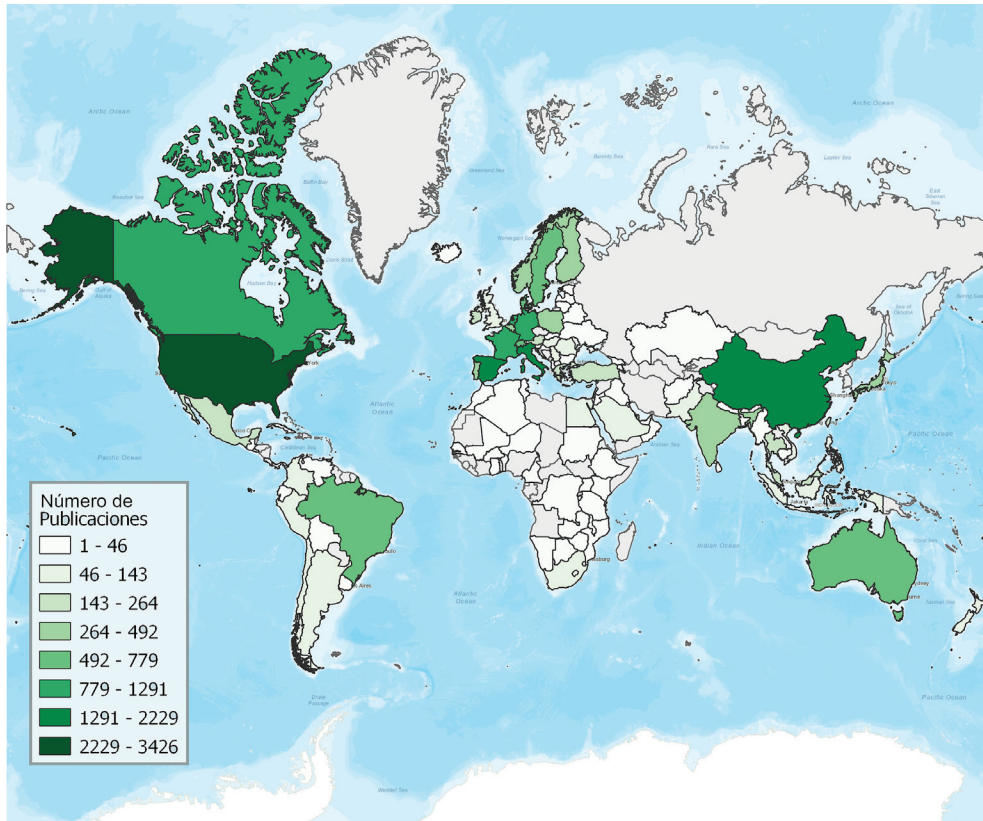


**Figura 2.**

Número de artículos científicos desarrollados durante 2010-2020.  
Fuente: Elaboración propia.

Los países líderes en esta temática son Estado Unidos, China, Italia, Canadá, España, Suiza, como se muestra en la Figura 3. Brasil es uno de los países que se destaca en Latinoamérica con más de 492 artículos científicos.





**Figura 3.**

Países que lideran la temática de ACV.

Fuente: Elaboración propia.

Otros de los resultados obtenidos de la búsqueda científica y procesada con el software VOSviewer fueron las principales áreas de aplicación. Según se visualiza en la Figura 4, las áreas de aplicación se pueden juntar en 4 grandes grupos, tales como "Energía", "Gestión", "Sustentabilidad", y "Emisiones".

Dentro del área de energía, se destaca la biomasa como centro para la producción de biocombustibles. Mientras que, en los temas de emisiones, la mayoría de los estudios se focalizan en la cuantificación de la emisiones con efecto invernadero (GEI) o también conocidas como huella de carbono.

Como se destaca en el gráfico, el ACV es una herramienta esencial en la evaluación de estudios orientados a la sustentabilidad, en diferentes niveles, ya sea desde etapas de diseño, desarrollo de modelos, análisis de comportamiento de productos o sobre la sustentabilidad del sector de la construcción.

Con respecto al área de Gestión, se destaca la gestión de residuos sólidos mediante alternativas de reciclaje, incineración, producción de biogás, entre otras. También las estrategias de economía circular son temas de interés para ser evaluados desde la perspectiva de ACV.

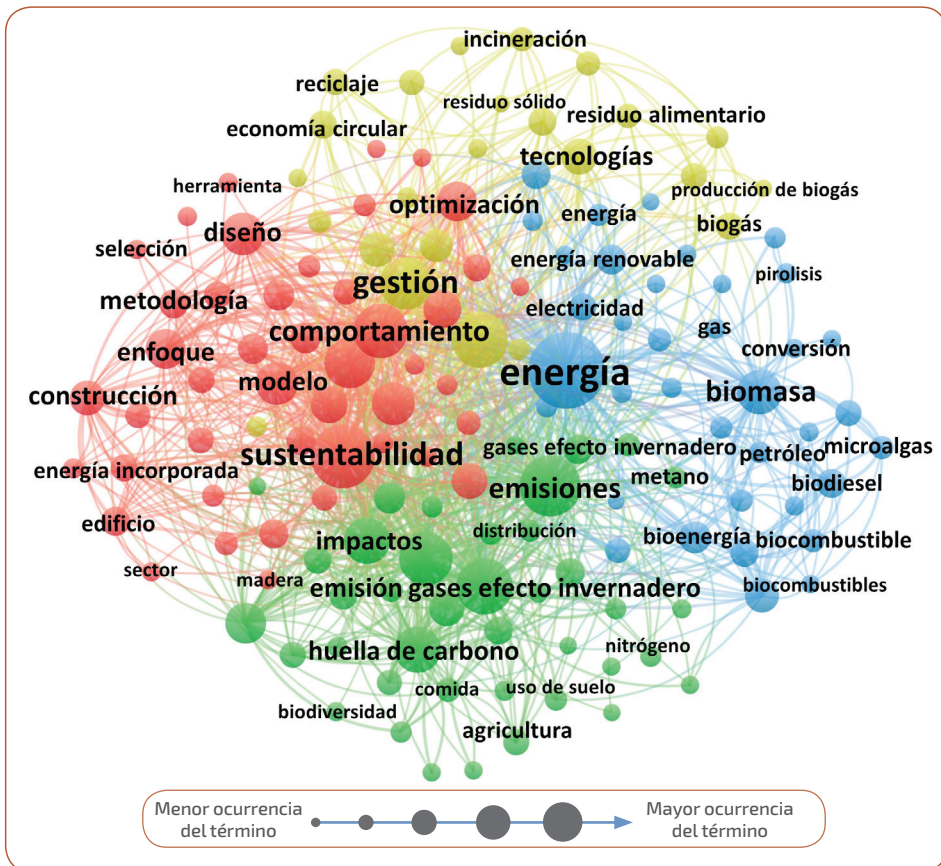


Figura 4.

Principales áreas de aplicación del ACV.  
Fuente: Software VOSviewer.

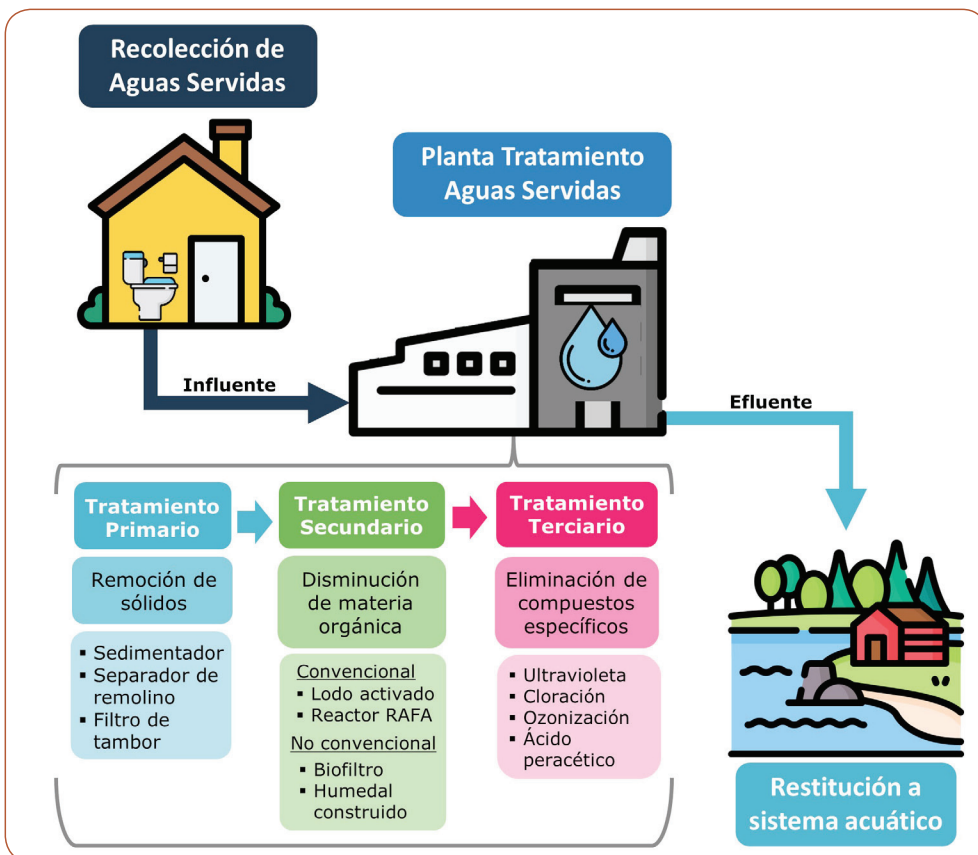
Particularmente, los sistemas de tratamiento de aguas servidas no se vislumbran de forma explícita (Figura 4) dentro del área de "Gestión". Sin embargo, estos sistemas están claramente considerados en la producción de biogás, tecnologías y en la economía circular.

Los sistemas de tratamiento de agua servidas constituyen una parte esencial dentro del ciclo antrópico del agua, y su objetivo es disminuir la carga de contaminantes emitidos hacia los ecosistemas acuáticos receptores, proveniente de los residuos líquidos urbanos o aguas servidas. Sin embargo, la operación de las tecnologías convencionales de tratamiento es intensiva en el uso de energía y recursos; generan lodos, los cuales requieren de tratamiento adicional y emiten contaminantes a la atmósfera, principalmente emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), precursores del calentamiento global (Yamaka *et al.*, 2021), entre otros aspectos ambientales a lo largo de su ciclo de vida.

---

## SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Los sistemas de tratamiento de aguas servidas permiten la reducción de los contaminantes hasta concentraciones que no impliquen alteración en el medio ambiente. Es por ello, que se requiere de una serie de etapas fisicoquímicas y biológicas orientadas principalmente a la eliminación de sólidos, nutrientes, patógenos y materia orgánica. Los sistemas de tratamiento se pueden agrupar en tres grupos según se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.**

Principales tratamientos involucrados en los PTAS. RAFA: reactor anaerobio de flujo ascendente.

Fuente: Adaptado desde Araya *et al.*, (2014).

**a) Tratamiento primario:** En el tratamiento primario se agrupan mayormente las operaciones del tipo físico, con el objetivo de eliminar sólidos en suspensión presentes en el influente. En estos procesos se pueden incluir diferentes procesos, tales como, sedimentación, flotación, coagulación, floculación y filtración. En el caso del sedimentador, éste es un proceso físico que busca separar las partículas por gravedad, logrando que una partícula más densa que el agua se deposite en el fondo del sedimentador.

**b) Tratamiento secundario:** En cuanto a los tratamientos secundarios, el objetivo en éstos es remover la materia orgánica biodegradable, coloidal y disuelta. Esto se realiza a través de procesos biológicos, los cuáles transforman estos compuestos en gas y biomasa.

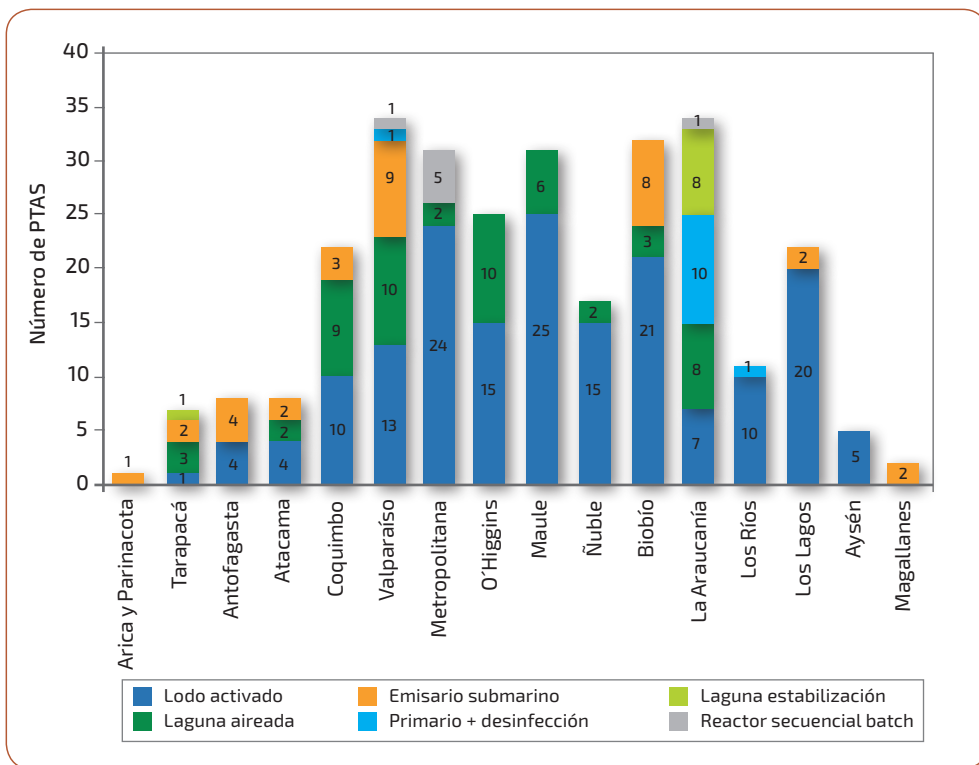
Existen diferentes tecnologías aplicadas al tratamiento secundario de aguas servidas, dividiéndose en sistemas convencionales y no convencionales. En los primeros, es posible encontrar tecnologías como lodos activados y el uso de reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA). El tratamiento con lodos activados es el tratamiento más utilizado debido a que presenta niveles de eficiencia de un 90% para DQO, 93% para  $\text{NH}_4\text{-N}$  y un 59 para  $\text{PO}_4^{3-}$  (Elmansour *et al.*, 2022); mientras que los reactores RAFA a diferencia del anterior, producen energía a través del biogás producido y presentan eficiencias de un 70% para DQO (Alcaraz-Ibarra *et al.*, 2020) y eliminación de contaminantes microbiológicos del orden de 2 uLog (unidades logarítmicas) para Coliformes totales (Slompo *et al.*, 2019).

Como se mencionó, también es posible encontrar tecnologías no convencionales. Algunas de ellas son la utilización de biofiltros y de Humedales Construidos (HC). Los primeros también son llamados lombrifiltros y basan su tratamiento en lombrices y bacterias combinadas con diferentes estratos.

**c) Tratamiento terciario:** Los tratamientos terciarios permiten remover contaminantes específicos, usualmente tóxicos o compuestos no biodegradables, incluyendo la remoción complementaria de contaminantes no removidos en el tratamiento secundario, tales como nutrientes (nitrógeno y fósforo) y organismos patógenos. Dentro de estos tratamientos es posible encontrar el uso de agentes químicos como cloro y ácido peracético, los cuáles logran eficiencias de remoción de 1,8-5,9 uLog y 0,4-4,2 uLog para Coliformes totales respectivamente (de Oliveira Freitas *et al.*, 2021). Mientras que, tratamientos físicos como el uso de radiación ultravioleta y ozono logran eficiencias de remoción de un 99,97% y de 2 uLog para Coliformes totales respectivamente (Caretti and Lubello, 2003; Gehr *et al.*, 2003).

En la actualidad, Chile cuenta con 301 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). La tecnología más usada en el país son los lodos activados, representando el 57,8% del total de plantas existente; seguida de las lagunas aireadas (18,3%) y los emisarios submarinos (11,0%) según se muestra en la Figura 6 (SISS, 2021).





**Figura 6.**

Número de PTAS por región y tecnología utilizada.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SISS, (2021).

Chile se ha convertido en el país con mayor cobertura de saneamiento en América Latina, sin embargo, sólo entre el 18-20% de las aguas servidas en las zonas rurales tiene tratamiento (Leiva *et al.*, 2022), teniendo en estas zonas mayormente la presencia de organizaciones sociales como los Comités de Agua Potable Rural (APR) quienes prestan los Servicios Sanitarios Rurales (SSR). Al año 2021, en Chile se contaba con la presencia de 2.235 organizaciones, teniendo de éstas 644.698 arranques (DOH, 2021).

## CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS EN LA APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

En los últimos años, un número creciente de investigadores han aplicado el ACV para evaluar el desempeño ambiental de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) a nivel de planificación, conceptualización y diseño previo a su instalación, optimización y modernización, y hasta el desarrollo de nuevas tecnologías, entre otros (Corominas *et al.*, 2020). En la Figura 7 se especifican los objetivos y alcances que se pudieran abordar para cada nivel.

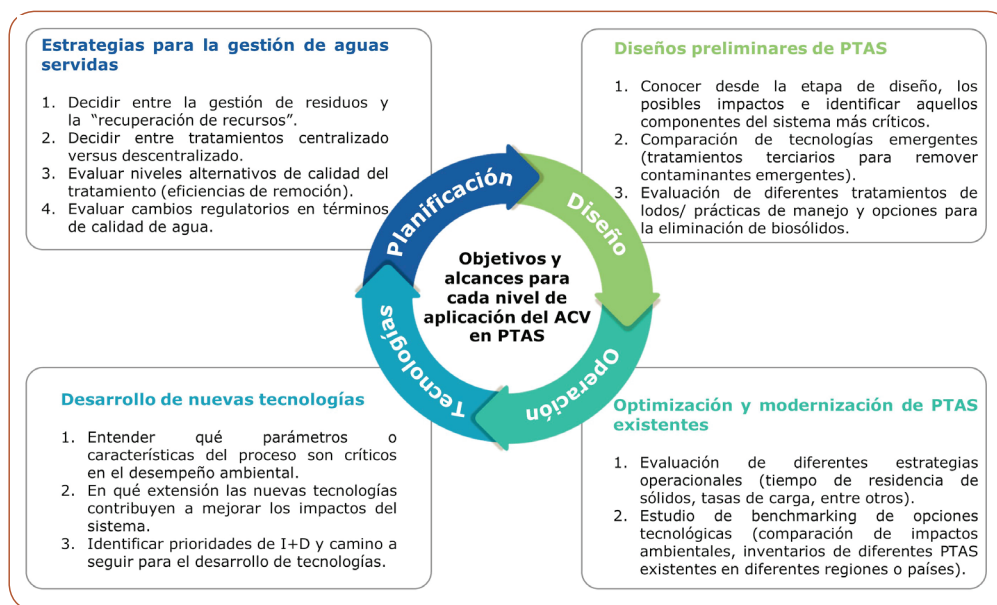


Figura 7.

Objetivos y alcances para cada nivel de aplicación del ACV en PTAS.  
Fuente: Adaptado de Corominas *et al.*, (2020).

Para los objetivos y alcances que se quiera llevar a cabo a cualquier nivel en PTAS, el ACV especifica la necesidad de definir una serie de aspectos metodológicos, tales como unidad funcional, límites y alcances, así como el modelo de evaluación de impactos usados para calcular las cargas ambientales; los cuales contribuyen significativamente a los resultados y variabilidad de los impactos ambientales resultantes.

A continuación, se abordan los principales aspectos metodológicos a considerar al momento de evaluar ambientalmente las PTAS usando la metodología de ACV.

### **Unidad funcional**

La unidad funcional más utilizada para PTAS es referida en términos de volúmenes de agua, principalmente de agua tratada (ejemplo, 1 m<sup>3</sup> de agua tratada) (Corominas *et al.*, 2020; Nguyen *et al.*, 2020; Zang *et al.*, 2015). Sin embargo, en la literatura existen muchas otras unidades referidas a la funcionalidad de las PTAS; es decir, a la remoción de contaminantes (ejemplo, 1 kg de carbón removido, 1 kg de nitrógeno total removido) (Corominas *et al.*, 2020; Nguyen *et al.*, 2020). También, la unidad funcional puede reflejar la población equivalente que emitiría una determinada cantidad de agua servida para su tratamiento (120 persona equivalente) (Casas Ledón *et al.*, 2017; Delre *et al.*, 2019). El mayor inconveniente de la variedad de unidades funcionales es que dificultan la comparación entre diferentes procesos y tecnologías de tratamiento de aguas servidas.

### **Límites del sistema**

En cuanto a los límites y alcances del sistema, se está muy relacionado a cuáles son los procesos que se considerarán dentro de los límites de los sistemas de tratamientos de las aguas servidas. Idealmente, se debería considerar desde que se producen los recursos (energía, químicos, infraestructura) consumidos para el tratamiento de aguas, hasta el destino final de los residuos (lodos, emisiones al aire y al agua) o productos derivados del mismo tratamiento. Sin embargo, no necesariamente todas las etapas, aguas arriba y abajo, del sistema son considerados o justificados por su baja contribución.

La Figura 8 muestra posibles límites del sistema encontrados para diferentes estudios en PTAS convencionales.

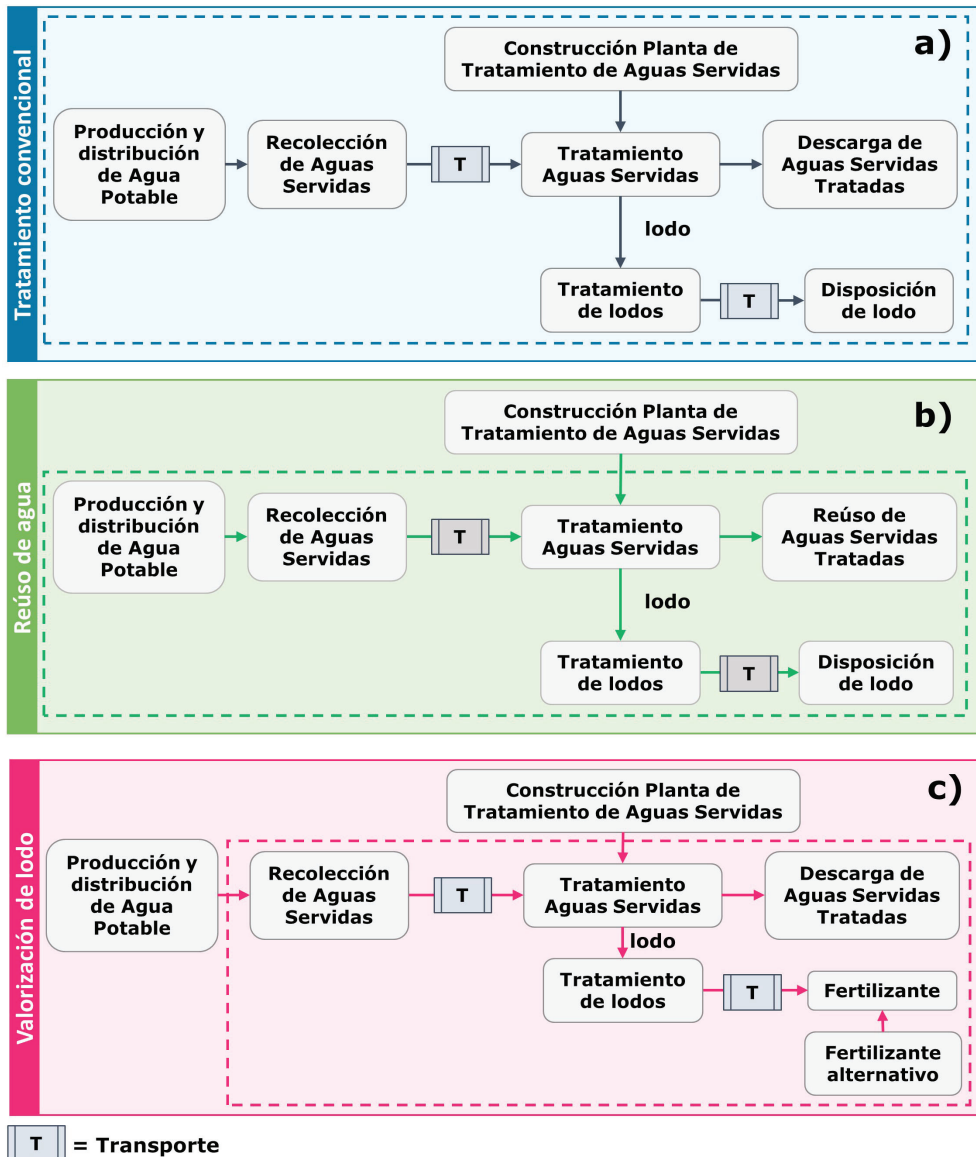


Figura 8.

Ejemplo de límites de sistemas para PTAS:  
 a) Tratamiento convencional; b) Reúso de agua; c) Valorización de lodo.

Fuente: Elaboración propia.

En este contexto, ha existido debate en torno a qué etapas del sistema serán considerados, algunos estudios han mostrado como etapas controversiales las siguientes:

**a) Fase de construcción de PTAS:** Estudios han demostrado que, para sistemas convencionales de tratamiento, es decir, el uso de lodos activados, donde es intensivo el consumo de energía, la etapa de construcción de la planta tiende a tener bajas contribuciones (< 5%) desde el punto de vista ambiental en comparación con la fase de operación de la planta (Morera *et al.*, 2017).

Por ejemplo, Chile tiene una matriz energética aún dependiente de fuentes no renovables de energía, tales como carbón (43%) y gas natural (15%) (CNE, 2018), a diferencia de Brasil, en donde el sector eléctrico se basa en centrales hidroeléctricas (84% del total), y donde los combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo) solo comparten el 16%. Esto implicaría que la misma tecnología con la misma eficiencia de remoción y consumos energéticos pudiera tener mayores impactos ambientales en Chile que en Brasil, debido a los impactos asociados a la matriz energética.

Por otra parte, cuanto menor sea el tamaño de los sistemas de tratamiento y menos intensivo en energía y químicos, se puede esperar mayor contribución de la etapa de construcción de la planta. Los humedales construidos son un típico ejemplo de sistemas de tratamiento de aguas servidas poco intensivos en recursos durante la etapa de operación, por lo que su ciclo de vida está influenciado principalmente por la fase de construcción.

**b) Fase de recolección de las aguas servidas (alcantarillado):** Estos sistemas son regularmente excluidos dentro de la definición de los límites y alcances de las PTAS, para cuando generalmente se realizan estudios comparativos o se evalúan estrategias de mejoras. Sin embargo, para evaluaciones más amplias, considerando todo el ciclo urbano del agua, así como, para la comparación entre enfoques centralizados y descentralizados la fase de alcantarillado desde su construcción hasta su funcionamiento deberían ser consideradas (Lane *et al.*, 2015).

**c) Fase de tratamiento de lodos:** Los límites, además de considerar el origen donde se producen las aguas servidas, también pueden extenderse hasta las etapas que consideran tratamiento de algunos de los residuos (lodos y agua tratada). Los cuales pudieran ser reutilizados en otros procesos; por ejemplo, los lodos como fertilizantes (Heimersson *et al.*, 2016; Lam

*et al.*, 2020) y las aguas tratadas reusarse para fines agrícolas (Carré *et al.*, 2017; Moretti *et al.*, 2019).

Al definir los límites del sistema, se debe tener cuidado con la disposición de los lodos. Mientras que la disposición en relleno sanitario es una práctica muy común en muchos países, su uso como sustitutos de fertilizantes en la agricultura también son experiencias que se están llevando a cabo.

Sin embargo, en esta última aplicación pueden generarse inconsistencias al momento de identificar los tipos de fertilizantes existentes, cual sería desplazando y la cantidad a sustituir. En el primer caso, los diferentes fertilizantes tienen diferentes cadenas de suministro de acuerdo con su origen y tecnología, generando diferentes compensaciones al biosólido. Con respecto a la cantidad a sustituir dependerá del contenido de nutrientes de biosólidos y los requisitos de absorción/biodisponibilidad de la planta.

### **Selección de métodos y categorías de impactos ambientales**

En función de los objetivos y alcances del estudio, se requieren diferentes categorías de impactos, los cuales son dependientes de los tipos de métodos existentes para evaluar impactos ambientales (p. ej., Eco-Indicator 99, Método EPD, CML, IMPACT 2002+, ReCiPe, TRACI I, BEES, entre otros). La selección de métodos y categorías de impacto no siempre constituye un paso fácil para los no expertos debido a la variedad de enfoques. Existen métodos orientados a la causa que genera un determinado impacto, denominados como puntos intermedios. Sin embargo, existen otro grupo de métodos que están orientados a los daños hacia las personas, el ecosistema y los recursos, los cuales se denominan puntos finales. No existe un consenso de cuál es el mejor método de evaluación de impactos ambientales para PTAS.

La selección de cada método definirá sus propias categorías de impactos, las cuales pudieran ser coincidentes entre dichos métodos. Indistintamente del método usado, las categorías de impactos más relevantes para las PTAS son (Corominas *et al.*, 2020; Nguyen *et al.*, 2020; Zang *et al.*, 2015):

- Potencial de eutrofización,
- potencial de calentamiento global,
- categorías de impacto relacionadas con la toxicidad,
- potencial de acidificación,
- potencial de oxidación fotoquímica,
- agotamiento de la capa de ozono,

- uso de energía (indicador)
- y otros indicadores emergentes (ejemplo., uso del agua, uso de la tierra).

La categoría de impacto de eutrofización ha sido considerada una de las más relevante en la evaluación de las PTAS, debido a los nutrientes remanentes en el efluente que se descargan a cuerpos de agua superficiales (Garrido-Baserba *et al.*, 2014), principalmente asociados a las emisiones de fósforo (P), nitrógeno (N) y en menor medida, orgánicos degradables (DQO).

El potencial de calentamiento global asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero (metano, dióxido de carbono, dióxido de nitroso), también han sido otros de los impactos relevantes en el ciclo de vida de los sistemas de tratamiento de aguas servidas. Muchas investigaciones apuntan que la producción de electricidad requerida en el funcionamiento de las PTAS es el principal contribuyente de las emisiones de gases de efecto invernadero (Rodríguez-García *et al.*, 2012). Sin embargo, durante la operación de dichos sistemas también se pueden generar emisiones directas de estos gases derivados de la degradación de materia orgánica en efluentes y la aplicación de lodos en el suelo. Estudios realizados por Rodríguez-García *et al.* (2012) confirman que dichas emisiones en particular dióxido de nitroso ( $N_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) de origen fósil puede ser más relevante para el calentamiento global que los generados por la producción de la electricidad y consumo de productos químicos.

La producción de electricidad es una etapa dominante en el ciclo de vida de las PTAS (Moretti *et al.*, 2019). Es por ello, que la mayoría de las veces los mayores potenciales impactos sobre las categorías de acidificación, toxicidades, oxidación fotoquímica se relacionan principalmente a como está formada la matriz eléctrica.

---

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN PTAS

### Caso de estudio 1: Valorización de lodos

Los lodos constituyen unos de los principales residuos generados en la operación de las PTAS. Sin embargo, estos son una gran fuente de materia orgánica renovable para la recuperación sostenible de recursos, como la recuperación de nutrientes como fertilizantes o energía. La valorización del lodo ha traído consigo el cambio de paradigma del lodo como un "desecho"

a convertirse en un "producto". Las consecuencias de este cambio de paradigma han sido evaluadas mediante la aplicación del ACV.

Estudios realizados por Cartes *et al.* (2018) han considerado diferentes alternativas de manejo de lodos en Chile, donde se ha podido comparar ambientalmente las prácticas actuales de manejo de lodos con la digestión anaeróbica avanzada (DA) con la finalidad de producir energía. En este apartado, se mostrarán los resultados para dos de los cuatros escenarios propuestos por los autores.

**Escenario 1:** Digestión anaeróbica que incluye ultrasonido secuencial, pre-tratamiento térmico y aplicación de lodos agrícolas.

**Escenario 2:** Es la práctica actual de manejo de lodos, el cual considera la estabilización química con cal con el fin de lograr un lodo clase B (apto para aplicación al suelo) para tener disposición en predio ya sea forestal o agrícola.

Para comparar ambos escenarios se eligió la estabilización de 1 tonelada de lodos (base seca) para expresar los impactos ambientales. Los subsistemas considerados dentro de los límites del sistema para ambos escenarios se describen en la Figura 9.

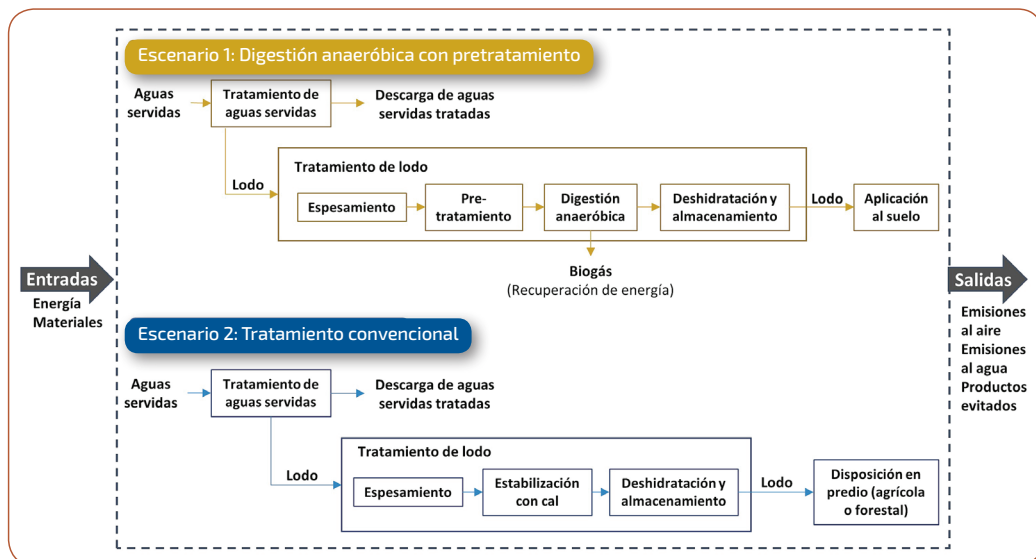


Figura 9.

Subsistemas y límites del sistema, de los escenarios seleccionados.  
Fuente: Adaptado de Cartes *et al.* (2018).



Los resultados muestran que el escenario de digestión anaeróbica presentó impactos potenciales más bajos que el escenario de estabilización con cal en todas las categorías evaluadas, como se muestra en la tabla.

Los beneficios ambientales del sistema de digestión anaeróbico se deben a que simultáneamente, a la estabilización de 1 ton de lodo, se estarían produciendo electricidad y calor, los cuales reemplazarían la producción de electricidad de la matriz eléctrica de Chile y el calor proveniente de gas natural. Es por ello, que la categoría de impacto "calentamiento global" tiene valores negativos, entendiéndose que hay muchos más beneficios cuando se evita que la matriz energética chilena emita gases con efecto invernadero generados para estabilizar 1 ton de lodos.

Esta compensación, es la responsable de la reducción tan significativa en las categorías de impactos de calentamiento global, acidificación, eutrofización terrestre y agotamiento de recursos para el escenario de digestión anaeróbico en comparación con el convencional.

De los resultados obtenidos de este estudio, se puede concluir que la alternativa de digestión anaeróbica es una alternativa prometedora desde el punto de vista ambiental cuando se compara con las prácticas tradicionales de manejo de lodos, basado en estabilización química.

**Tabla 2.**

Categorías de impactos evaluadas para tratamiento convencional y digestión anaeróbico referidas a 1 ton de lodo (base seca).

| Categorías de impactos   | Unidades              | Tratamiento convencional | Digestión anaeróbico con pretratamiento |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| Cambio climático         | kg CO <sub>2</sub> eq | 714.74                   | -12.65                                  |
| Acidificación            | mol H <sup>+</sup> eq | 44.00                    | 0.09                                    |
| Eutrofización terrestres | mol N eq              | 193.60                   | 8.81                                    |
| Eutrofización agua dulce | kg N eq               | 9.57                     | 8.93                                    |
| Eutrofización marina     | kg P eq               | 108.83                   | 106.02                                  |
| Agotamiento de recursos  | kg Sb eq              | 41.24*10 <sup>-4</sup>   | 3.56*10 <sup>-4</sup>                   |

## Caso de estudio 2: Reúso de aguas servidas

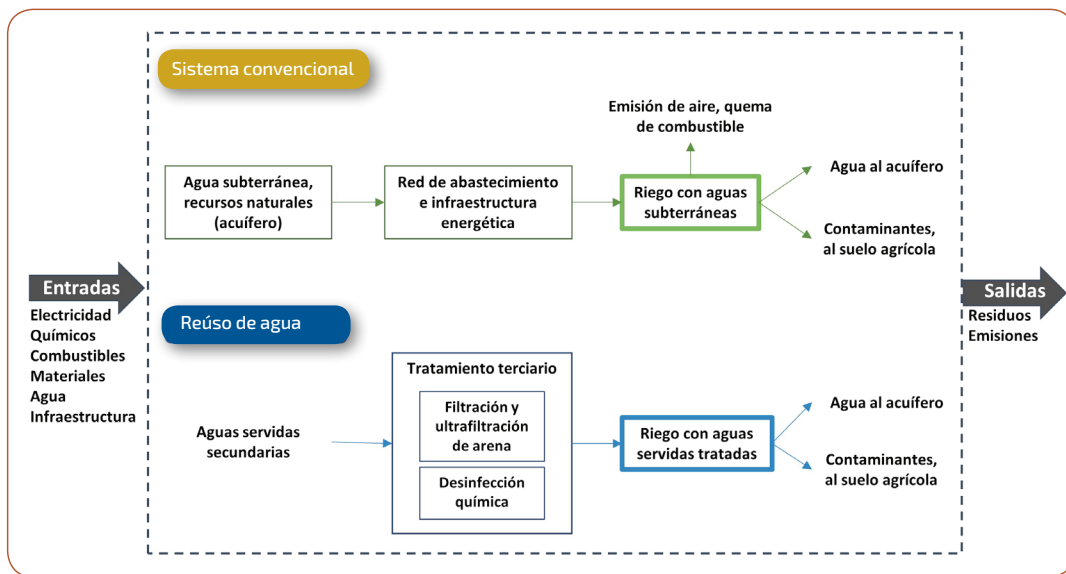
Tradicionalmente los sistemas de tratamientos de aguas servidas consideran tratamiento primario y secundario. Hasta dichos niveles de tratamiento, las aguas tratadas no presentan la calidad adecuada para su reutilización para la agricultura, aplicaciones urbanas (ejemplo, limpieza de carreteras), industriales y ambientales, tales como preservación de humedales o incluso su uso directo como agua potable. Para ello se requiere adicionalmente procesos de tratamiento terciario.

Existen diferentes tecnologías de tratamiento terciario, pero el uso de una tecnología o combinación de ellas dependerá de la calidad del agua que se quiera obtener, la cual dependerá de su aplicación. ElACV puede proporcionar información ambiental y apoyar la toma de decisiones hacia la selección de qué tecnología pudiera ser más factible en función de la aplicación que se desea o sencillamente se da respuesta a si es ambientalmente factible reusar aguas servidas para diferentes propósitos.

Estudios realizados por Canaj *et al.* (2021), evaluaron ambientalmente un esquema de producción y reúso de aguas provenientes de PTAS para fines agrícolas. En este caso, se evaluaron dos escenarios según se describen a continuación:

- **Sistema convencional.** Las aguas subterráneas son utilizadas para el riego en la agricultura y donde el efluente secundario se vierte directamente al mar.
- **Reúso de agua.** El agua reusada para riego vendría de un sistema de tratamiento terciario (filtros presurizados de arena y de Ultrafiltración con membrana), el cual trataría el efluente secundario para llevarlo a los estándares de calidad requeridos para su reúso.

La unidad funcional escogida fue 1 m<sup>3</sup> de agua de calidad apta para el riego en la agricultura. Los límites del sistema partirán desde el efluente secundario tratado hasta el reúso de agua en la agricultura para el escenario de Reúso de Agua según se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.**

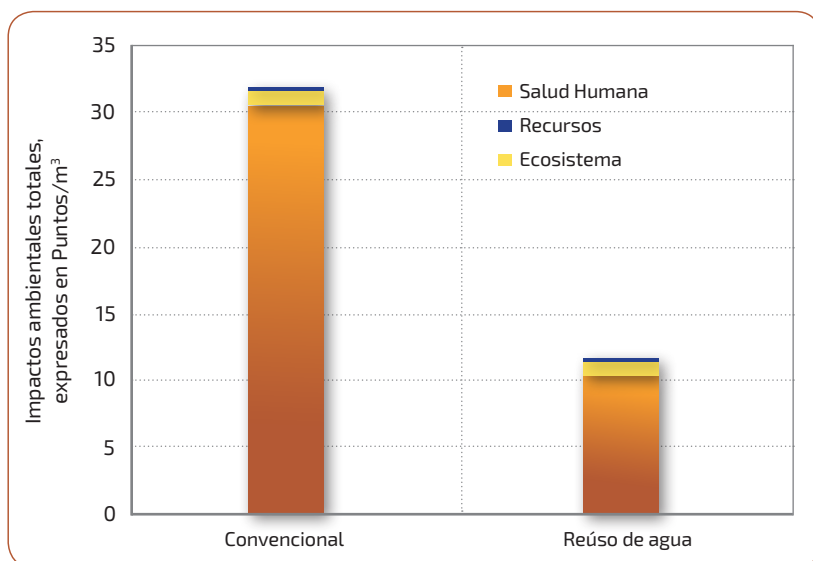
Límites del sistema y alcances para el Sistema convencional y Reúso de Agua. Fuente: Adaptado de Canaj *et al.*, (2021).

Los impactos ambientales totales para cada escenario y la contribución de cada categoría de daño se muestran en la Figura 11. En este estudio, se usó el modelo ReCiPe 2016 orientado a categorías de daños sobre la salud humana, ecosistema y recursos.

Los resultados muestran que la reutilización de agua presenta beneficios ambientales, reduciendo aproximadamente el 63% los impactos ambientales totales en comparación con el escenario sin reúso de agua. Analizando, los impactos sobre las tres categorías de daños que considera dicho modelo se pueden observar que las mayores contribuciones están asociadas a los daños sobre la salud humana para ambos escenarios, causados principalmente a la producción de energía eléctrica demandada durante la operación de cada escenario.

La producción de electricidad es una etapa dominante en el ciclo de vida de los escenarios estudiados y es la consecuencia de los mayores daños sobre la salud humana, el ecosistema, y agotamiento de recursos.

El escenario de Reúso de Agua presenta los menores daños sobre la salud humana y los ecosistemas. Este comportamiento se le atribuye a que se evita extraer más cantidad de agua fresca del ecosistema, pero al mismo tiempo se reducen los efectos de la contaminación por el vertimiento de las aguas tratadas del tratamiento secundario asociado a la calidad que proporciona el sistema terciario. Es por ello, que el reúso de agua se convierte en una alternativa prometedora ambientalmente y puede contrarrestar el agotamiento del agua en regiones con un estrés hídrico muy alto.



**Figura 11.**

Puntuaciones finales y contribuciones de las categorías de daño al impacto ambiental total. Fuente: Adaptado desde Canaj *et al.* (2021).

## CONCLUSIÓN

El ACV es una poderosa herramienta que permite un análisis exhaustivo de, en primer lugar, diferentes sistemas antropogénicos, tales como productos manufacturados, sistemas agrícolas o de gestión de residuos y, en segundo lugar, muchos impactos ambientales, como el cambio climático, la eutrofización, las toxicidades, entre otras.

Particularmente el ACV, ha motivado a los sistemas de tratamiento aguas servidas a innovar y mejorar sus servicios, dando lugar a nuevos productos en el mercado para la conversión de residuos en recursos fomentando la economía circular; por ejemplo, la transición del lodo como "residuo" a "producto". Al mismo tiempo, ha permitido identificar estrategias de optimización e innovación atractivas ambientalmente en comparación con prácticas convencionales. Así como, visualizar el potencial del reúso de las aguas para diferentes fines usando diferentes tratamientos terciarios, que en la actualidad se convierte en una gran oportunidad frente a los escenarios de escasez hídrica asociados a los efectos del cambio climático.

Es decir, el ACV entrega información valiosa para los procedimientos de tomas de decisiones. Sin embargo, la estandarización de los resultados ambientales de las diferentes estrategias de gestión derivadas de las PTAS a procesos similares es muy complejo, debido a que los impactos ambientales son sensibles a las consideraciones metodológicas realizadas, tales como, tipo de unidad funcional, límites del sistema y alcances (si se consideró parcial o totalmente la cadena de valor de una ruta determinada), compensaciones de cargas ambientales, entre otras. Al mismo tiempo, las características tecnológicas en función de las realidades locales son parámetros que influyen en las magnitudes de los impactos ambientales.

Por lo tanto, la información que entregan los estudios de ACV debe ser cuidadosamente analizada y sopesar las peculiaridades de cada zona geográfica, diferencias tecnológicas y consideraciones metodológicas para una mejor interpretación de la información ambiental entregada.

Por otra parte, el uso intensivo de esta herramienta en el desarrollo de políticas públicas aun es limitado, principalmente para países de Latino América y el Caribe. Se espera que en la medida que evoluciona el marco legislativo en los países y aumenta la experiencia en la aplicación del ACV, sumada a un consumidor más educado que opta por las alternativas sostenibles, su implementación sea determinante para impulsar los Objetivos de Desarrollo Sustentables y avanzar hacia una economía circular.

## REFERENCIAS

- Alcaraz-Ibarra S., Mier-Quiroga M.A., Esparza-Soto M., Lucero-Chávez M., Fall C. 2020. Treatment of chocolate-processing industry wastewater in a low-temperature pilot-scale UASB: Reactor performance and in-situ biogas use for bioenergy recovery. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105786.
- Araya F., Pesante S., Vera L., Vidal, G. 2014. Las aguas servidas en las zonas rurales: En Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Vidal G., F. Araya F. (Eds.). Ediciones Universidad de Concepción. ISBN 978-956-227-378-7. 121 p.
- Canaj K., Mehmeti A., Morrone D., Toma P., Todorović M. 2021. Life cycle-based evaluation of environmental impacts and external costs of treated wastewater reuse for irrigation: A case study in southern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126142.
- Carré E., Beigbeder J., Jauzein V., Junqua G., Lopez-Ferber M. 2017. Life cycle assessment case study: Tertiary treatment process options for wastewater reuse. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(6), 1113-1121.
- Caretti C., Lubello C. 2003. Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study. *Water Research*, 37(10), 2365-2371.
- Cartes J., Neumann P., Hospido A., Vidal G., 2018. Life cycle assessment of management alternatives for sludge from sewage treatment plants in Chile: does advanced anaerobic digestion improve environmental performance compared to current practices? *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 1530-1540.
- Casas-Ledón Y., Rivas A., López D., Vidal G., 2017. Life-cycle greenhouse gas emissions assessment and extended exergy accounting of a horizontal-flow constructed wetland for municipal wastewater treatment: A case study in Chile. *Ecological Indicators*, 74, 130-139.
- Casas-Ledón Y. 2021. Historia y metodología del análisis de ciclo de vida: En Análisis de Ciclo de Vida: fundamentos y aplicaciones a la gestión sustentable de los recursos hídricos. Vidal G., Neumann P., Hospido A. (Eds). Ediciones Universidad de Concepción. ISBN 978-956-227-481-4. 130 p.

- Comisión Nacional de Energía (CNE). 2018. Generación bruta mensual Sistema Eléctrico Nacional.
- Corbella C., Puigagut J., Garfí M. 2017. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Science of The Total Environment*, 584–585, 355–362.
- Corominas L., Byrne D.M., Guest J.S., Hospido A., Roux P., Shaw A., Short M.D., 2020. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Research*, 184, 116058.
- Davidson J. Summerfelt S.T. 2005. Solids removal from a coldwater recirculating system—comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering*, 33(1), 47-61.
- Delre A., ten Hoeve M. Scheutz C. 2019. Site-specific carbon footprints of Scandinavian wastewater treatment plants, using the life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1001-1014.
- de Oliveira Freitas B., de Souza Leite L. Daniel L.A. 2021. Chlorine and peracetic acid in decentralized wastewater treatment: disinfection, oxidation and odor control. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 620-628.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2021. Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales. Servicios Sanitarios Rurales. <http://www.doh.cl/SSR/index.html>
- Elmansour T.E., Mandi L., Hejjaj A. Ouazzani N. 2022. Nutrients behavior and removal in an activated sludge system receiving Olive Mill Wastewater. *Journal of Environmental Management*, 305, 114254.
- Garrido-Baserba M., Hospido A. Reif R., Molinos-Senante M., Comas J., Poch M. 2014. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. *Environmental Modelling & Software*, 56, 74-82.
- García-Sánchez L., Gutiérrez-Macías T., Estrada-Arriaga E. 2019. Assessment of a Ficus benjamina wood chip-based aerated biofilter used for the removal of metformin and ciprofloxacin during domestic wastewater treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94, 1870-1879.

- Gehr R., Wagner M., Veerasubramanian P., Payment P. 2003. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 37(19), 4573–4586.
- Guinée J., Heijungs R., Huppes G., Zamagny A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T. 2011. Life cycle assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science Technology*, 45, 90–96.
- Heimersson S., Svanström M., Laera G., Peters G. 2016. Life cycle inventory practices for major nitrogen, phosphorus and carbon flows in wastewater and sludge management systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1197–1212.
- International Organization for Standardization. 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- JRC. 2010. European Commission. A guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment, Making sustainable consumption and production a reality.
- Lam K.L., Zlatanović L., van der Hoek J.P. 2020. Life cycle assessment of nutrient recycling from wastewater: A critical review. *Water Research*, 173, 1–16.
- Lane J.L., de Haas D.W., Lant P.A. 2015. The diverse environmental burden of city-scale urban water systems. *Water Research*, 81, 398–415.
- Leiva A.M., González Y., Gómez G., Vidal, G. 2022. Potenciales efectos del reúso de las aguas servidas tratadas en la agricultura: desafíos de las tecnologías de tratamiento en Chile: En Agua, ecosistemas y salud pública. Matus P., Barra R., Gómez G., Vidal G (Eds.). Ediciones Universidad de Concepción. In press.
- Longo S., d'Antoni B.M., Bongards M., Chaparro A., Cronrath A., Fatone F., Lema J.M., Mauricio-Iglesias M., Soares A., Hospido A. 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy*, 179, 1251–1268.
- Morera S., Corominas L., Rigola M., Poch M., Comas J. 2017. Using a detailed inventory of a large wastewater treatment plant to estimate the relative importance of construction to the overall environmental impacts. *Water Research*, 122, 614–623.



- Moretti M., Van Passel S., Camposeo S., Pedrero F., Dogot T., Lebailly P., Vivaldi G.A. 2019. Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region. *Science of The Total Environment*, 660, 1513–1521.
- Nguyen T.K.L., Ngo H.H., Guo W.S., Chang S.W., Nguyen D.D., Nghiem L.D., Nguyen T.V. 2020. A critical review on life cycle assessment and plant-wide models towards emission control strategies for greenhouse gas from wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 264, 110440.
- Reap J., Roman F., Duncan S., Bras B. 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: Goal and scope and inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 290–300.
- Rodriguez-Garcia G., Hospido A., Bagley D.M., Moreira M.T., Feijoo G. 2012. A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 37–46.
- Rodriguez-Garcia G., Molinos-Senante M., Hospido A., Hernández-Sancho F., Moreira M.T., Feijoo G. 2011. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research*, 45, 5997–6010.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2021. Resultados Plantas de tratamiento de aguas servidas 2021. Superintendencia de Servicios Sanitarios.
- Slompo N.D.M., Quartaroli L., Zeeman G., da Silva G.H.R. Daniel L.A. 2019. Black water treatment by an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: a pilot study. *Water Science and Technology*, 80(8), 1505–1511.
- Sonnemann G., Strothmann P., Weyand S., Valdivia S. 2016. Opportunities for national life cycle network creation and expansion around the world. United Nations Environment Programme.
- Valdivia S., Quispe I., Mila i Canals L. 2015. Regional stakeholder consultation on LCA databases in Latin America.

- Valdivia S., Sonnemann G., Milà i Canals L. 2017. LCA mainstreaming conditions in Latin America—based on learnings from 2005 to 2014. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 485–491.
- Vera I., Araya F., Andrés E., Sáez K. Vidal G. 2014. Enhanced phosphorus removal from sewage in mesocosm-scale constructed wetland using zeolite as medium and artificial aeration. *Environmental Technology*, 35(13), 1639-1649.
- Vidal, G., Neumann, P. y Hospido, A. ed. 2022. Análisis de ciclo de vida: Fundamentos y aplicaciones para la gestión sustentable de los recursos hídricos. 2022. Ediciones Universidad de Concepción. ISBN 978-956-227-481-4. 130 p.
- Yamaka W., Phadkantha R. Rakpho P. 2021. Economic and energy impacts on greenhouse gas emissions: A case study of China and the USA. *Energy Reports*, 7, 240-247.
- Zamagni A., Buttol P., Porta P.L., Buonamici R., Masoni P., Guinee, J., Heijungs R., Ekvall T., Bersani R., Bienkowska A., Pretato U. 2008. Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice - Deliverable D7 of work package 5 of the CALCAS project. Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability, 1–106.
- Zang Y., Li Y., Wang C., Zhang W., Xiong W. 2015. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 107, 676–692.



Universidad de Concepción

# SUSTENTABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS UNA MIRADA DESDE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Yannay Casas / Yenifer González / Gloria Gómez  
Eduardo Holzapfel / Nicolás Arroyo / Gladys Vidal

Serie Comunicacional CRHIAM

