

# Informe de conclusiones sobre inversión en sistemas circulares de tratamiento de agua y energía renovable para América Latina y el Caribe con enfoque Nexo

Presentado por:

Alfredo Montañez Velásquez

Presentado a:

Agencia GIZ Colombia



Agosto de 2022

## Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>PRESENTACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>LA PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE .....</b>	<b>3</b>
2.1	EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN ALC: SITUACIÓN .....	3
2.2	METAS Y ACUERDOS PARA EL AVANCE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN ALC .....	6
<b>3</b>	<b>DE RESIDUO A RECURSOS: OPORTUNIDADES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES .....</b>	<b>8</b>
3.1	ALCANCE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR .....	8
3.2	ECONOMÍA CIRCULAR Y DESARROLLO SOSTENIBLE .....	10
3.3	ECONOMÍA CIRCULAR Y AGUA .....	11
3.4	POTENCIAL TECNOLÓGICO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	12
<b>4</b>	<b>BENEFICIOS ESPERADOS DE LA ECONOMIA CIRCULAR EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>19</b>
4.1	BENEFICIOS ECONÓMICOS DIRECTOS .....	19
4.2	BENEFICIOS AMBIENTALES .....	21
4.3	BENEFICIOS SOCIALES .....	22
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>24</b>

## 1 PRESENTACIÓN

De acuerdo con el objetivo del contrato correspondiente al “Apoyo a la investigación sobre Inversión en sistemas circulares de tratamiento de agua y energía renovable para América”, en este documento se presenta el Informe de conclusiones sobre inversión en sistemas circulares de tratamiento de agua y energía renovable para América Latina y el Caribe con enfoque Nexo.

## 2 LA PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE

En este capítulo se presenta una descripción de la problemática de las aguas residuales en América Latina y el Caribe (ALC) (apartado A). A continuación, se realiza un análisis de las metas que los distintos países de la región pactaron y se fijaron para avanzar en el tratamiento de aguas residuales urbanas, en el marco de las contribuciones determinadas a nivel nacional (apartado B).

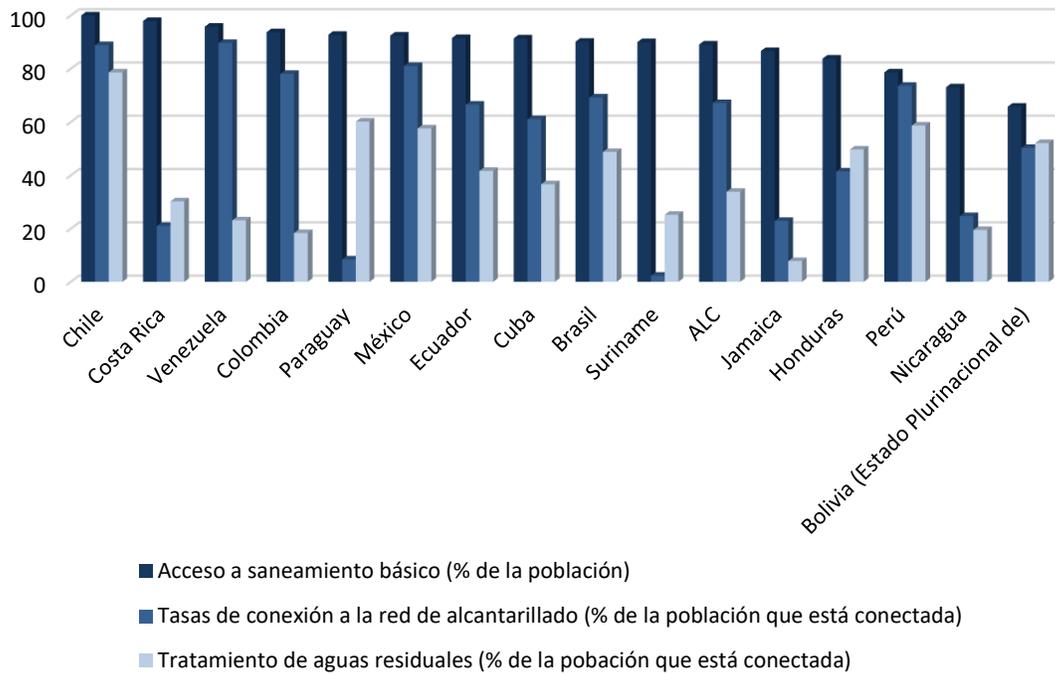
### 2.1 El tratamiento de aguas residuales en ALC: situación

En América Latina y el Caribe una de las principales fuentes de contaminación del agua es el inadecuado tratamiento de las aguas domésticas. Por lo común, en las poblaciones pequeñas y medianas no existe una regulación precisa a este respecto, y muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) se encuentran en mal estado o abandonadas debido a su insuficiencia tanto de recursos económicos como de capacidad operativa. En cuanto a las localidades rurales, solo una baja proporción dispone de sistemas de recolección de aguas residuales, y menos aún de PTARs (Peña, 2016).

En 2020, aproximadamente 7 personas de cada 10 en la región no tenían acceso a saneamiento gestionado de manera y hasta un cuarto de los tramos de los ríos se encuentra afectado por la contaminación patógena severa, con concentraciones mensuales de la bacteria coliforme fecal de más de 1000cfu/100ml, observándose un incremento sustancial de casi dos tercios entre 1990 a 2010. Esta contaminación del agua se origina mayormente en las aguas residuales domésticas de alcantarillas (PNUMA, 2016).

Como se muestra en el Gráfico 1, los niveles de gestión y tratamiento del agua residual varían de forma importante entre los distintos países de ALC, y los promedios regionales enmascaran esta gran variación.

**Gráfico 1**  
**Acceso a servicios de saneamiento y tratamiento de aguas en países seleccionados de ALC, 2020**  
(En porcentajes)

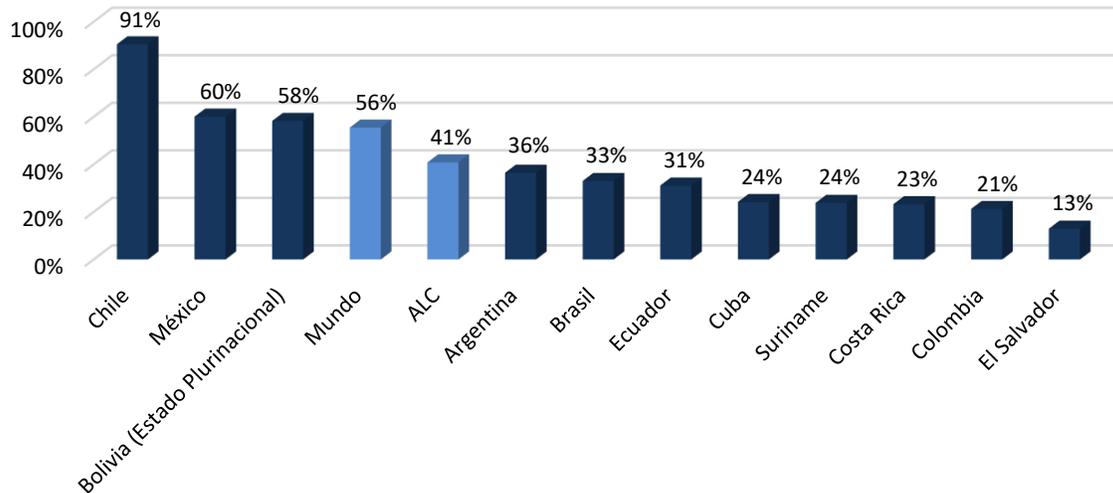


Fuente: Elaboración propia, sobre JMP (Programa Conjunto de Vigilancia del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento), 2021.

Con respecto al indicador de la meta 6.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), relativo a la calidad de los cuerpos de agua, la mayoría de los países de ALC no han proporcionado información para su seguimiento y solo 11 de los 33 países miembros de la CEPAL han reportado datos sobre el porcentaje de aguas residuales tratadas de forma segura (indicador 6.3.1).

La marcada ausencia de información disponible pone de manifiesto un importante y claro atraso en la materia; sin embargo, al valorar las estadísticas de los países que sí reportan información, es posible apreciar el rezago de la región. En efecto, en ocho de los once países que suministran datos, el tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico –de forma adecuada/segura–, no supera el 40% del total (Gráfico 2). El Salvador informó la menor cobertura de tratamiento de forma segura: solo el 12,95%, por detrás de Colombia, Costa Rica, Surinam y Cuba, los cuales reportan coberturas por debajo del 25%.

**Gráfico 2**  
**Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura en ALC, 2020**  
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, con base en UNSTAT (División de Estadística de las Naciones Unidas, 2021).

La situación es similar con respecto al indicador 6.3.2, referente a la proporción de cuerpos de agua que presentan buena calidad ambiental y no plantean riesgos para el medio ambiente o la salud humana. En este sentido, la falta de datos y de monitoreo cercano genera una preocupación adicional, puesto que la contaminación de los cuerpos de agua es una de las principales externalidades ambientales que pueden llegar a destruir ecosistemas completos, eliminar sus beneficios (provisión de agua dulce y alimentos, regulación del clima y servicios culturales) y dificultar su sostenibilidad (Saravia Matus y otros, 2020).

En la mayoría de los países de América Latina y el Caribe es una práctica común verter aguas residuales en lagos, ríos y arroyos sin tratamiento apropiado, lo que plantea graves problemas a los hogares que se encuentran a lo largo de estos cursos de agua y que dependen de ellas para el suministro de agua potable (Schady, 2015). Por tal motivo, muchos sistemas fluviales como el río Medellín en Colombia y el río Matanza Riachuelo en Argentina, responsables del abastecimiento de agua potable para la población de esas localidades y del riego para productos de consumo humano y animal, y que constituyen el medio de vida de muchas especies acuáticas animales y vegetales, se encuentran altamente contaminados.

La emisión de cargas de nutrientes con compuestos provenientes del nitrógeno y del fósforo es, además, precursora del “florecimientos de algas nocivos” (FAN), que proliferan cuando existe gran radiación solar y altas temperaturas. Estas floraciones tienen muchas veces lamentables efectos tóxicos en organismos como peces y aves, y consecuentemente para las personas que los consumen,

lo cual puede implicar desde alergias hasta la muerte si la toxina es letal para tales organismos (por ejemplo, la marea roja) o para los humanos (cianotoxinas producidas por microalgas, un componente biológico microscópico del agua). Los FAN coinciden con el aumento poblacional en las zonas costeras, pues se vierten más aguas urbanas al mar (Guzmán, 2019).

Por otro lado, la falta de tratamiento de aguas residuales se correlaciona con brotes de enfermedades tan graves como la hepatitis A (González y otros, 2019). El virus de la hepatitis A (HAV) es un peligroso patógeno que se transmite por vía fecal-oral. La epidemiología de la infección está directamente implicada con el acceso de la población al agua potable y con la infraestructura de alcantarillado (Báez y otros, 2016). Un estudio realizado en la Universidad de Concepción en Chile concluye que en una zona de inundación marina analizada, muy contaminada con materia fecal humana, existía una concordancia espacio-temporal con un brote de hepatitis A entre la población costera. Además, en otros países de Latinoamérica se ha evidenciado previamente la circulación del HAV en muestras ambientales en ciudades como Córdoba en Argentina, Caracas en Venezuela y Río de Janeiro en Brasil (ibid). Es importante mencionar que la contaminación fecal humana es potencialmente más riesgosa que la de origen animal, porque en aquella proliferan todos los patógenos específicos del humano, como el mencionado virus de la hepatitis A (González y otros, 2019).

Todo lo anterior es más preocupante en el contexto del cambio climático. Según el informe IPCC 2021, ALC es una de las regiones del mundo más afectadas por los desastres relacionados con el clima. Los fenómenos hidrometeorológicos, como inundaciones, tormentas, sequías y olas de calor, representan el 93% de todos los desastres ocurridos en los últimos veinte años. En un escenario de escasez hídrica, cuando disminuyen los caudales, la capacidad de dilución de los sistemas fluviales se minimiza y con ello se afecta la resiliencia de los ecosistemas para amortiguar los cambios, con lo cual disminuye su posibilidad de presevar la biodiversidad y aumentan las concentraciones de materias contaminantes. Igualmente, durante lluvias torrenciales se pueden llegar a inundar los fosos sépticos creando situación de alto riesgo para la salud pública.

La retracción de los glaciares y la intrusión salina, junto con la distribución desigual de las precipitaciones, se reflejan en la disminución del agua disponible. Las sequías pueden tener graves impactos negativos en la calidad del agua necesaria para la agricultura de regadío (Peña-Guerrero y otros, 2020). En los periodos de sequía se intensifica el uso de aguas residuales sin tratamiento para el riego, práctica extensamente utilizada en algunos países de ALC. Esto conlleva el riesgo de que niños y adultos que trabajan en labores agrícolas, al igual que quienes consumen sus productos, contraigan diversas infecciones y enfermedades del tracto digestivo por bacterias, por virus o por el contacto con protozoos, y causa en el ganado enfermedades como la brucelosis por la ingesta de aguas residuales y alimentos regados con las aguas no tratadas, lo cual afecta, por supuesto, a quienes consumen su carne (Cisneros, 2015).

## 2.2 Metas y acuerdos para el avance en el tratamiento de aguas residuales en ALC

Para conocer el avance en el tratamiento de aguas residuales en ALC, se revisaron las contribuciones nacionales determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) de los países de la región. Ellas dan cuenta de los acuerdos y metas que los distintos países pactaron y se fijaron para avanzar en el tratamiento de aguas residuales. La información analizada se obtuvo del registro provisional de contribuciones nacionales determinadas [Secretaría de la CMNUCC (ONU Cambio Climático), 2021].

Es importante mencionar que todos los países de ALC ya han reportado sus primeras NDC y que apenas tres (Argentina, Granada y Surinam) de 33 estados han reportado sus segundas NDC, y deben hacerlo antes de 2025 según el Acuerdo de París.

Luego de la revisión de los documentos, se pudo verificar que 12 de los 33 países (36%) incluían en sus NDC contribuciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales (domésticas e industriales). Por otro lado, ocho países (24%) reportaban en sus NDC previsiones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales domésticas específicamente.

En el Cuadro 1 se presenta un resumen de lo propuesto en las NDC de cada país. En los compromisos asumidos se destaca el rol del tratamiento de aguas residuales para reducir las emisiones de metano a la atmósfera y fortalecer la resiliencia en el sector.

**Cuadro 1**

<b>Resumen de propuestas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de las NDC en ALC por país</b>	
<b>País/año reporte<sup>a</sup></b>	<b>Detalle</b>
<b>América del Sur</b>	
<b>Bolivia (Estado Plurinacional de) (2016)</b>	Acciones para el logro de los resultados vinculados con el agua: Plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales para reducir sus aportes de metano hacia la atmósfera.
<b>Chile (2020)</b>	Medidas consideradas en los escenarios proyectados 2030 y 2050: Uso de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, como bioestabilizador forestal. En un escenario de carbono neutral: Nuevas plantas de tratamiento en la Gran Concepción y el Gran Valparaíso para 2035, con gestión del metano y uso de lodos.
<b>Colombia (2020)</b>	Meta: Alcanzar 68% del tratamiento de aguas residuales urbanas domésticas en 2030. Objetivo: Aumentar la cobertura y calidad en el tratamiento del caudal de aguas residuales a fin de proteger las cuencas y fuentes abastecedoras de acueductos más contaminadas y fortalecer, con criterios de adaptación al cambio climático, los procesos involucrados en la ejecución del programa Saneamiento de Vertimientos (SAVER). Uso previsto, impacto y resultados estimados: A partir de la priorización realizada por el programa SAVER, optimizar o construir infraestructura sostenible capaz de afrontar los retos del cambio climático; al igual que gestionar información sobre tecnología que facilite la adaptación
<b>México + América Central</b>	
<b>Costa Rica (2020)</b>	La contribución de Costa Rica en el área temática de residuos está centrada en la gestión integral de residuos, en particular los orgánicos, y en la modernización de su sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, en particular en áreas urbanas. Contribución: Meta 8.4: En el año 2030, al menos el 50% de las aguas residuales en las áreas de alta densidad poblacional recibirán tratamiento, incorporando criterios de resiliencia al cambio climático. Meta 8.2: Al 2026 se habrá actualizado el monto base del canon de aprovechamiento de agua, vertidos de aguas residuales y servicios ambientales, considerando el cambio climático y criterios de eficiencia en el uso. Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales
<b>Guatemala (2017)</b>	Mitigación: Implementación del Reglamento de Aguas Residuales -Acuerdo Gubernativo 236- 2006-, como un instrumento para el tratamiento de las emisiones producidas por este sector.
<b>México (2020)</b>	Línea de acción D3. Aumentar el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas, asegurando la cantidad y buena calidad del agua en asentamientos humanos mayores que 500,000 habitantes
<b>Nicaragua (2020)</b>	Acciones a mediano plazo a considerar en futuras NDC (2025 – 2030): Biodigestores en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Desde 2007 los sistemas de tratamiento de aguas residuales han aumentado significativamente; en 2010, 13 cabeceras departamentales brindaban tratamiento a las aguas residuales Desde el inicio de operaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Managua el porcentaje de tratamiento de las aguas residuales recolectadas en la ciudad mejoró significativamente, de 35.22% en 2007 a 98.19% para 2011, y el índice de tratamiento pasó de 19.66% a 57.63% a nivel nacional.
<b>El Caribe</b>	
<b>Santa Lucía (2021)</b>	Objetivo: Reducir emisiones en todo el sector utilizando 2010 como año base, que abarquen el sector de energía. Co-beneficio: Reducción de las emisiones de la gestión de aguas residuales e introducción de tecnologías de energía renovable en el sector del agua;

Fuente: elaboración propia en base a NDC por país.

<sup>ha</sup> Para hacer el presente análisis se consideró la última actualización disponible.

La revisión de estas NDCs indica que muchos de estos países están planteando la inclusión de principios de economía circular en la mejora del tratamiento de sus aguas residuales. De este modo, el presente estudio pone valor económico, social y ambiental a los escenarios que se están plantando los países para contribuir al cumplimiento del Acuerdo de París.

### 3 DE RESIDUO A RECURSOS: OPORTUNIDADES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

La economía circular es una forma de concebir los procesos productivos como un sistema compatible con los recursos disponibles. Así, para asegurar la sostenibilidad de dicho sistema se pretende aprovechar al máximo los recursos y disminuir los desechos con base en la reutilización, la reparación y el reciclaje. La circularidad permite gestionar más eficazmente los recursos y disminuir la dependencia de la economía del uso de recursos finitos, e incluso mejora la productividad y brinda resiliencia a largo plazo.

Los procesos de economía circular pueden implementarse en los sistemas de aguas residuales municipales, dado que es factible reusar las aguas residuales tratadas para que vuelvan a formar parte del ciclo. Asimismo, en lugar de emplear energía proveniente de fuentes convencionales en su tratamiento, es posible implementar sistemas para la emisión y captación de biogás, y cogeneración de energía calórica y eléctrica, teniendo como efecto directo la limitación del uso de combustibles fósiles, al recuperar energía del proceso. Esto se alinea con uno de los principales llamados de la COP26, la "reducción del uso de carbón como fuente de energía y subsidios a los combustibles fósiles". Finalmente, a partir de la recuperación de nutrientes de estas aguas residuales se puede limitar tanto la emisión de gases de efecto invernadero como de desechos, y en su lugar generar beneficios a partir de su venta.

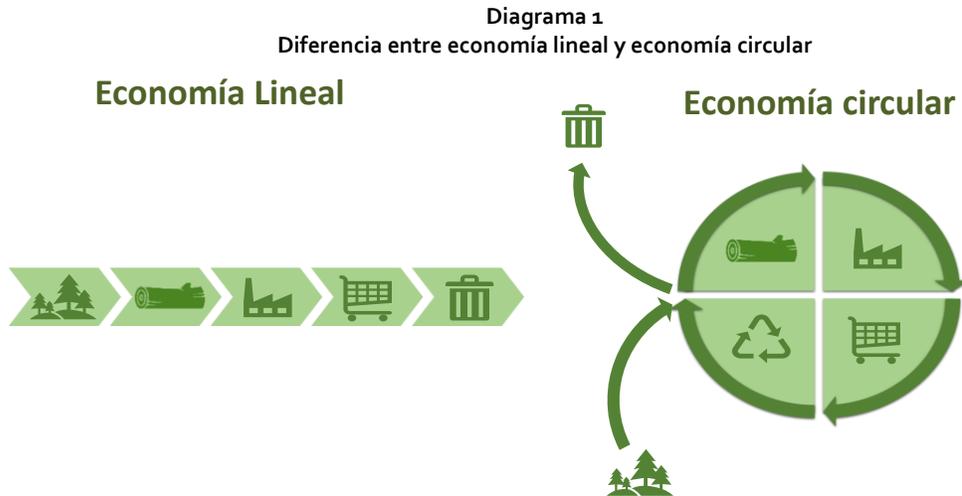
En los siguientes apartados se repasa el concepto de economía circular, su vínculo con los objetivos de desarrollo sostenible y su relevancia en materia de aguas (apartado A). Luego se revisa en detalle el potencial tecnológico para la implementación de esquemas de circularidad en el tratamiento de aguas residuales (apartado B), destacando las posibilidades que brinda i) el reúso de las aguas servidas, ii) el aprovechamiento del biogás para la generación de energía, entre otras opciones y iii) la extracción de nutrientes; identificando para cada una de estas categorías las principales ventajas y desafíos para su adopción. Finalmente, se evidencian los beneficios que representa adoptar estas técnicas de economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales (apartado C), tanto en los ámbitos económico y social como en ambiental, para los países de América Latina y el Caribe.

#### 3.1 Alcance de la Economía Circular

La economía circular se define como un nuevo paradigma que propone desacoplar el crecimiento económico de la explotación de recursos naturales finitos y del uso de energía, basado en la regeneración de los recursos y en el incremento de la eficiencia en su uso (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Mulder y Albaladejo, 2020).

La economía circular se contrapone al concepto de economía lineal, que define la corriente de producción tradicional como un proceso de "extraer-producir-desechar", de forma lineal, como su nombre lo indica (Diagrama 1). La economía lineal es el resultado de prácticas productivas, comerciales y de consumo que suponen un suministro constante de productos provenientes de los recursos naturales, lo que pone en peligro la provisión y sostenibilidad de servicios ecosistémicos esenciales. Aquí, la recolección de materias primas conduce a un alto consumo de energía y agua, a la emisión de sustancias tóxicas y a la alteración del capital natural. En términos de volumen, se estima que cerca de 82 mil millones de toneladas de materias primas ingresaron al sistema económico en 2020, y se espera que esta cifra continúe creciendo en el futuro (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Pese a que hay intentos de mejora, la economía lineal en sí misma es insostenible.

Con la economía circular se busca, entonces, minimizar el impacto en toda la cadena de valor del servicio o producción, de forma que sea sostenible ambiental, social y económicamente. Son sistemas de producción y consumo que promueven el uso eficiente de materiales, agua y energía (Quirós, 2021). Asimismo, tienen en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales (Ibíd.).



Fuente: EcoGreen Mundo (2015).

Los principios del sistema de economía circular son seis y se conocen como las 6R<sup>1</sup> (Quirós, 2021) porque incluyen:

- **Repensar y reducir:** referido a utilizar los recursos de manera más eficiente;
- **Rediseñar:** considerando opciones de reutilización, reparación y reciclaje antes de la producción;
- **Reutilizar:** fomentando el reúso de productos a lo largo de la cadena de producción;
- **Reparar y remanufacturar:** considerando opciones de mantenimiento y revisión de productos;
- **Reciclar:** procesamiento y reutilización de materiales a partir de los desechos; y
- **Recuperar:** enfocado principalmente en la obtención de energía a partir de los materiales.

Asimismo, se evita la eliminación e incineración de desechos antes de lograr su máximo aprovechamiento posible. Ello implica un nuevo enfoque en el diseño de productos que considere su

---

1 El número de principios varía a lo largo de la literatura. Inicialmente se establecieron las llamadas 3R de la economía circular: Reducir, Reutilizar y Reciclar (King y otros, 2006; Brennan y otros, 2015; Ghisellini y otros, 2016). La Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea introdujo 'Recuperar' como la cuarta R. A partir de entonces los académicos han propuesto ir más allá del marco de 4R, y postulan las 6R aquí expuestas (Sihvonen y Ritola, 2015), las 9R (Van Buren y otros, 2016; Potting y otros, 2017), e incluso las 38R (Srinivas, 2021).

durabilidad y Prefabricación, así como reutilizar productos y componentes, reciclar materiales e implementar sistemas de cultivo de tierra regenerativos.

Con la circularidad la economía hace una gestión de recursos más eficaz que redundante en múltiples beneficios, entre los que cabe destacar la desvinculación gradual y sistémica de la actividad económica del consumo de recursos finitos y la mejora en productividad, lo cual brinda resiliencia a largo plazo a las ciudades y los países.

En cuanto a sus beneficios específicos, la economía circular conlleva mejoras ambientales al proponer la eliminación de los sistemas de producción que consumen mucha energía o agua, así como un cambio hacia el uso de materiales menos tóxicos (Ellen MacArthur Foundation, 2013; UNEP, 2012). Ambos factores se reflejarán en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, en el uso correcto del agua y en la protección de la biodiversidad. Asimismo, este nuevo enfoque económico genera beneficios sociales como la creación de empleo y la disminución de los costos de alimentos y servicios, reduce las externalidades sociales y promueve la innovación (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Gower y Schröder, 2016; Schröder y otros, 2019).

La adopción de los principios de economía circular se percibe como una vía para reducir la exposición a los choques en los precios de los recursos y mitigar la necesidad de absorber los costos de disposición de desechos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Para la Unión Europea se estima que el cambio hacia una economía circular podría reducir el gasto neto en recursos en 700.000 millones de dólares anuales y generar un beneficio neto de 2,1 billones de dólares por año (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Por tales razones, las prácticas de economía circular se consideran de significativa importancia para la transformación del enfoque tradicional de la economía hacia sistemas de consumo y producción sostenibles.

### 3.2 Economía circular y desarrollo sostenible

Hay una fuerte relación entre la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Aspectos como el reciclaje de residuos domésticos, de residuos electrónicos y de aguas residuales, el uso de energía renovable y la mayor eficiencia en la utilización de los recursos, son más que suficientes para apoyar varios de estos objetivos.

Las relaciones más sólidas entre las prácticas de la economía circular y las metas de los distintos objetivos de la Agenda se pueden identificar en el ODS 6, de Agua Limpia y Saneamiento; en el ODS 7, de Energía Asequible y No Contaminante; en el ODS 8, de Trabajo Decente y Crecimiento Económico; en el ODS 12, de Producción y Consumo Responsables y en el ODS 15, de Vida de Ecosistemas Terrestres (Schröder y otros, 2019). Particularmente, el reciclaje y la reutilización de aguas contribuye de forma directa a las metas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 14.1; la reducción de residuos, a las metas 12.3 y 12.5; la simbiosis industrial que se crea a partir de la cauterización de las actividades en torno al aprovechamiento de la energía y los residuos desechados por otros, a las metas 3.9, 6.3, 7.3, 8.2, 12.4, 9.4 y 17.7 (MontesinosMartín, 2020).

Asimismo, se han identificado varias sinergias indirectas que surgirían al adoptar la economía circular. Estas se refieren a los objetivos que promueven el crecimiento económico y el empleo (ODS 8), la eliminación de la pobreza (ODS 1), la erradicación del hambre y la producción sostenible de alimentos (ODS 2), y la protección de la biodiversidad en los océanos (ODS 14) (Schröder y otros, 2019; Velenturf y Purnell, 2021). Estas sinergias, en mayor o menor medida, se encuentran presentes en prácticamente todos los ODS (Diagrama 2).

Diagrama 2

**Economía circular y Objetivos de Desarrollo Sostenible**

*Fracción de cada ODS que se habilitaría mediante la economía circular y tendría un impacto fuerte (rojo) o parcial (naranja)*



Fuente: Velenturf y Purnell (2021).

Por consiguiente, las prácticas de la economía circular, además de tender a sistemas sostenibles, se pueden aplicar para lograr un número considerable de metas de los ODS. En tal sentido, este enfoque se plantea como una solución y una herramienta de apoyo para los gobiernos si pretenden alcanzar las metas de desarrollo comprometidas.

### 3.3 Economía circular y agua

Considerando que los impactos del cambio climático afectan directamente los recursos hídricos, para enfrentarlos es crucial realizar acciones circulares en el sector del agua. Por ejemplo, ante la escasez hídrica, la acción climática debiese incluir la disminución de la demanda de agua, la reducción de sus pérdidas y la reutilización de aguas residuales tratadas, por nombrar solo algunos enfoques. El aumento de la resiliencia climática en el sector del agua va a menudo de la mano con posibles beneficios colaterales relacionados con la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), el desarrollo sostenible y la protección de los ecosistemas, incluida su biodiversidad (Denton y otros, 2014). Los impactos climáticos relacionados con el agua también afectan otros sectores, como la agricultura (por ejemplo, por su efecto sobre el riego) y la energía (por ejemplo, el agua para refrigeración), lo que exige además considerar el nexo entre agua, energía y alimentación (Kerres y otros, 2020). Todo lo anterior puede lograrse adoptando las prácticas de la economía circular.

La economía circular reconoce que el agua es un recurso finito. Dicho reconocimiento implica de plano, la búsqueda de la disminución del uso de recursos finitos como materia prima, motivo por el cual se evitará utilizar agua siempre que sea posible; es más: bajo este enfoque se pretenderá reutilizar al máximo el agua para superar las externalidades negativas generadas por su escasez o por su mala calidad. En una economía con este enfoque se minimiza el impacto de los sistemas productivos sobre las fuentes naturales, lo cual propicia la restauración de las cuencas y de los ecosistemas.

La economía circular apoya la seguridad hídrica y la resiliencia (Quirós, 2021) porque:

- Mejora la capacidad de almacenamiento del agua y su conservación;

- Incorpora un gran potencial de soluciones basadas en la naturaleza, promoviendo enfoques integrados y flexibles;
- Apoya la exploración del uso de recursos hídricos alternativos, incluida la reutilización de las aguas residuales tratadas.

En cuanto a aguas residuales, los beneficios de la economía circular son aún más evidentes. La recuperación de recursos de las instalaciones de aguas residuales se da en la forma de agua reutilizable, energía, biosólidos y nutrientes. Estos representan un beneficio económico y financiero que contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de suministro de agua y saneamiento, así como de las empresas que los operan (Rodríguez y otros, 2020). De tal manera, al aplicar los principios de la economía circular en la gestión de aguas residuales, la recuperación y reutilización de recursos transforma el saneamiento, que pasa de ser un servicio costoso a uno autosostenible y que agrega valor a la economía (*Ibid.*).

A continuación, se revisan las distintas técnicas y oportunidades para recuperar recursos a partir del tratamiento de aguas residuales municipales, incluido el reúso de las mismas aguas, el aprovechamiento de esos desechos en forma de energía y la extracción de nutrientes.

### 3.4 Potencial tecnológico de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales

Al adoptar el enfoque de la economía circular en el saneamiento de aguas se logra, por una parte, redefinir el agua residual, que deja de ser un desecho para considerarse un recurso reutilizable. Con ello, además de disminuir el desecho de aguas residuales en las ciudades, se generan nuevas fuentes de agua, lo que aumenta su oferta. Por otra parte, al aprovechar los desechos para la generación energética –en forma de calor, gas y electricidad–, se reemplazan otras fuentes de energía, se mejora el resultado y la sostenibilidad económica del tratamiento de las aguas residuales y se disminuyen las emisiones de metano, una fuente importante de gases de efecto invernadero, en línea con los postulados de la COP26.

El suministro, el transporte y el tratamiento del agua son procesos intensivos en energía, que contribuyen a las emisiones de carbono cuando son alimentados por combustibles fósiles. El uso de energía en las actividades relacionadas con el agua y las aguas residuales representa aproximadamente el 4% del consumo internacional de electricidad y podría duplicarse para 2040 (Kerres y otros, 2020). Asimismo, el tratamiento de aguas residuales puede generar emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), con un potencial de calentamiento global entre 80 y 300 veces más fuerte que el CO<sub>2</sub>, respectivamente (EPA, 2021; Kerres y otros, 2020). Por consiguiente, en lugar de generar desechos en forma de aguas sucias, derivados energéticos y emisiones de gases, es posible recuperar estas aguas, producir energía y obtener nutrientes.

Se estima que más del 80% de las aguas residuales globales no reciben ningún tipo de tratamiento (Kerres y otros, 2020), debido principalmente a que las necesidades de inversión en el sector de abastecimiento de agua y saneamiento son muy grandes y se encuentran en la mayoría de los casos muy rezagadas. Dado que las ciudades continúan creciendo, es imperativo garantizar que las inversiones en el sector se realicen de la manera más sostenible y eficiente, incorporando para ello tecnologías de economía circular como parte de los sistemas de gestión de sus desechos. En este contexto, las aguas residuales son y deben considerarse un recurso valioso del que se puede extraer energía y nutrientes, además de que se constituyen en una fuente adicional de agua (Rodríguez y otros, 2020).

Los procesos de economía circular pueden estar presentes en distintas etapas y dinámicas de los sistemas de aguas residuales. Como se mencionaba, pueden fomentar el reúso de las aguas residuales, la obtención de energía en forma de calor, de biogás o de electricidad, y la recuperación de nutrientes. El detalle de cada uno de estos procesos se explica a continuación, y se resaltan los beneficios y oportunidades derivados de adoptar estas técnicas de economía circular en el tratamiento de aguas residuales municipales.

## **1. Reúso de las aguas**

El agua residual municipal está compuesta en un 99,8% por agua (López y otros, 2017). Una vez tratadas, estas aguas pueden ser utilizadas con distintos fines, los más comunes son el riego, para uso en procesos industriales y en reposición de aguas subterráneas. En cuanto a su uso con fines domésticos, y en especial para la descarga de inodoros, ya se cuenta con varias tecnologías y sistemas que lo permiten (ibid).

En materia urbana, la principal reutilización de las aguas residuales tratadas es el riego residencial. Dado que en estos procesos la exposición humana es alta, se debe tener especial cuidado para evitar posibles problemas de salud. Por lo anterior, los países están elaborando e implementando cuerpos normativos específicos al respecto (Mo y Zhang, 2013). Siguiendo estos protocolos, las aguas pueden ser utilizadas para el riego de jardines, la descarga de inodoros, el lavado de vehículos, e incluso para su consumo directo. Se estima que en Estados Unidos se reutilizan alrededor de 64.000 millones de litros diarios de aguas residuales, y esta tasa aumenta 15% cada año (Mo y Zhang, 2013).

La reutilización del agua de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) tiene el potencial de brindar múltiples ventajas. Al instaurar estos sistemas es posible disminuir la incertidumbre que genera el cambio climático en el suministro y aumentar la oferta de agua disponible. Lo anterior se traduce en los consiguientes ahorros energéticos, al disminuir los requerimientos de energía utilizados en la obtención y distribución del agua. Además, la cantidad de agua que se puede reutilizar es proporcional a la demanda inicial o primaria, y el sistema es sostenible en el tiempo. Finalmente, reduce la necesidad de explorar fuentes de agua que consuman más energía, como la desalación.

La principal limitante para la adopción generalizada de sistemas de reúso de las aguas residuales es el costo asociado a la inversión inicial en la infraestructura de tratamiento, y la variabilidad de la calidad del efluente. Además, las preocupaciones por la salud y la seguridad ambiental siguen siendo factores de peso para una aplicación más amplia de esta práctica.

Cuando el agua tiene fines domésticos, puede reutilizarse en el sistema o red de agua potable directamente (Leverenz y otros, 2011). Entre los aspectos positivos que tal decisión conlleva, se indica que puede mejorar la confiabilidad general del suministro de agua, por lo que no se requiere de un sistema dual —conectado también a la red—, ni de sistemas de inyección o esparcimiento del agua, como sí lo precisan los sistemas indirectos (Ibid.). Sin embargo, el tratamiento del agua para su reutilización potable exige altos requisitos, los que pueden incrementar el costo operativo, además de que persiste la gran barrera de su baja aceptación pública (Mo y Zhang, 2013).

La recarga de napas subterráneas como parte del reúso de estas aguas sería la última de sus aplicaciones, y genera múltiples beneficios. Gracias a ella, es posible aliviar el hundimiento de la tierra, apaciguar la intrusión de agua de mar en las áreas costeras, proporcionar almacenamiento natural sin necesidad de recurrir a obras de infraestructura, con las pérdidas por evaporación que conllevan, además de funcionar como un filtro natural en donde las aguas reciben un tratamiento adicional que facilita su posterior recuperación y reutilización (Mo y Zhang, 2013). Representa, sin embargo, ciertos desafíos, entre los que se incluyen requerimientos de monitoreo de la calidad del agua y de la operación de las instalaciones. Además, la recarga de aguas residuales poco tratadas puede aumentar

el peligro de contaminación del acuífero. Finalmente, no toda el agua recargada puede recuperarse, debido a los movimientos del agua subterránea más allá del lugar de extracción o a la potencial contaminación que ocurra con agua subterránea de mala calidad.

## **2. Generación de energía**

Otro de los componentes de las aguas residuales que puede ser recuperado o regenerado es la energía. Aprovechando los residuos de las PTAR es posible obtener energía en diferentes formas: como calor, como biogás o como electricidad. A continuación, se revisa cada una de estas tecnologías, sus beneficios y sus desafíos para lograr su aplicación extendida.

### **a) Generación de calor (y frío)**

La extracción de energía calorífera de las aguas residuales de las PTAR suele realizarse mediante una bomba de calor, un equipo mecánico que transfiere aguas de un lugar a otro. Así, se aprovecha la temperatura del agua para calentar o enfriar un ambiente (GIZ, 2020). El sistema recupera el calor/frío de las aguas residuales haciéndolas pasar por tuberías, y emplea ese calor en calentar/refrigerar el mismo proceso de tratamiento o también instalaciones industriales, departamentos o casas particulares en la vecindad de la planta de tratamiento de aguas residuales. Las bombas de calor son una tecnología eficiente para el autoconsumo energético renovable, que cumple con los principios de la economía circular.

Estos sistemas tienen especial potencial de uso en el sector doméstico, para lo cual se encuentran ampliamente disponibles y cuentan con diversos diseños. Aprovechan la temperatura de las aguas residuales, que se mantiene constante a lo largo del año en torno a los 20 grados (Pistonesi y otros, 2010). Estas tecnologías permiten su implementación tanto en edificios residenciales que requieren de 5 kW a 30 kW, como en grandes edificios y esquemas de calefacción urbana de 100 kW a 1.000 kW o más (GIZ, 2020), y la perspectiva de su demanda es enorme si se considera que las proyecciones de demanda de energía en refrigeración de espacios estiman un crecimiento de más del doble para 2030 (IEA, 2016). Como se ve, estos equipos son altamente versátiles en cuanto a su aplicación en el sector municipal en el presente, pero lo serán aún más en el futuro.

Uno de los principales beneficios de las bombas de calor a partir de las PTAR es que son equipos altamente eficientes en términos energéticos: entregan entre 2 y 4 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica consumida (GIZ, 2020). De hecho, la Agencia Internacional de Energía considera que es esta la mejor tecnología de climatización disponible, y estima que la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la bomba de calor es de un 6%, con potencial de llegar a un 16% en el futuro (IEA, 2016). Además de ello, son aparatos duraderos que requieren poco mantenimiento. En cuanto al ahorro energético para abastecer de agua caliente y calefacción un bloque de edificios domiciliario, se estima un beneficio de USD \$990 anuales en comparación con el uso de una caldera de gas (Arnabat, 2017). Como se ve, sus ventajas son múltiples y representan ahorros económicos significativos.

En cuanto a las desventajas, la principal es que la inversión inicial para su implementación sigue siendo más elevada que la de los equipos convencionales de climatización. Sin embargo, esto se compensa con costos de operación considerablemente menores. De otra parte, las bombas suelen

emitir un nivel de ruido que en algunos casos puede ser molesto<sup>2</sup>. Además, en zonas climáticas muy frías o muy calientes las bombas pueden presentar reducciones considerables en su rendimiento, debido a que la temperatura de las aguas residuales se pierde antes de entrar al sistema (GIZ, 2020). Asimismo, los lugares que se quiere climatizar deben encontrarse aislados térmicamente, pues de lo contrario los sistemas consumirán más energía de lo esperado (Ibíd.). En tal sentido, además de la inversión inicial del equipo se debe considerar la habilitación de los espacios y del sistema completo.

#### **b) Aprovechamiento del metano y cogeneración de energía eléctrica**

Es posible aprovechar los desechos de las PTAR para generar energía en forma de gas. Esto ocurre al llevar a cabo la digestión anaeróbica (sin oxígeno) del agua residual municipal, en lugar de utilizar un tratamiento aeróbico. También se pueden utilizar los gases generados en la digestión de los lodos tanto en plantas de tratamiento anaeróbicas como aeróbicas. El proceso anaeróbico de las aguas residuales y de los lodos genera como subproducto gas metano (CH<sub>4</sub>). Este gas puede ser utilizado *in situ* para distintos procesos dentro de la planta de tratamiento, como calentar el digestor de lodos y elevar la eficiencia misma del proceso de digestión anaeróbica, así como para secar y reducir el volumen de los lodos antes de su disposición final (López y otros, 2017). Así mismo, este biogás, previa su limpieza de impurezas, puede luego ser utilizado directamente como combustible para fines vehiculares, industriales o residenciales.

La producción total de metano por unidad de tiempo (m<sup>3</sup>/día o similar) en una PTAR municipal depende principalmente de la tecnología de tratamiento, además de la concentración y composición de la materia orgánica presente en el agua residual, las cuales varían de acuerdo con la disponibilidad de agua potable, el nivel socioeconómico de la población, las infiltraciones de agua de lluvia en la red de alcantarillado, el tipo de instalación sanitaria y las actividades desarrolladas en la zona donde se recolectó el agua residual (Von Sperling, 2005). Asimismo, influyen en ello la temperatura del proceso y las características y eficiencia de la tecnología (López y otros, 2017).

La obtención de energía en forma de biogás tiene una serie de impactos positivos. El principal es la reducción de los requerimientos energéticos a nivel local. Por ejemplo, una PTAR aeróbica que tiene un gasto energético promedio de 100 kW/h a lo largo del año puede llegar a obtener una producción cercana a los 285 kW/h con un sistema anaeróbico de aprovechamiento de metano (Hernández, 2021)<sup>3</sup>. Asimismo, estos procesos disminuyen significativamente los desechos en la forma de lodos. Mientras que en los procesos aeróbicos comunes se generan entre 30-60 kg de lodos por cada 100 kg de material susceptible a oxidar, al implementar procesos anaeróbicos estos desechos podrían disminuir de manera significativa, llegando a los 5 kg de lodos (Hernández, 2021). Esto significa que estas tecnologías están especialmente alineadas con los conceptos de economía circular, pues reducen y reconvierten los residuos de un proceso productivo y los transforman en recursos disponibles para otros procesos.

Asimismo, es posible recuperar la energía proveniente de los lodos resultantes del tratamiento aerobio de las aguas residuales mediante la digestión anerobia de los mismos, por cuanto permite la

---

2 Hay equipos que utilizan suelo radiante o radiadores que generan niveles de ruido prácticamente imperceptibles; no así los que cuentan con ventiladores (GIZ, 2020).

3 Este dato es solamente un ejemplo referencial, ya que la eficiencia y la producción dependen del tamaño/capacidad de la planta, su ubicación geográfica y otras características ya mencionadas.

emisión, captación y el posterior aprovechamiento del metano en la generación o cogeneración de energía. Esta técnica ha probado que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en las plantas de tratamiento en un 21%, y que es posible aportar hasta el 14% de la energía requerida por la planta, además de los beneficios ambientales que ello comporta (AguilarBlanco, 2018).

El principal desafío para su implementación a escala masiva son los altos costos iniciales, en comparación con los procedimientos aeróbicos actualmente utilizados. Adoptar esta tecnología de manera industrial requiere además de la compra del reactor o de los digestores anaeróbicos, habilitar el sistema para el procesamiento del gas. Estos equipos incluyen gasómetros, compresores, desulfadores y generadores a motor<sup>4</sup>, entre otros (Linares, 2020). En resumen, pese a que este sistema representa innegables beneficios energéticos y la posibilidad de obtener beneficios, exige una alta inversión inicial si se realiza sin contar con una infraestructura previa o mínima desde el inicio.

Finalmente, los sistemas combinados de calor y energía utilizan el metano de las aguas residuales y de los lodos para obtener calor y electricidad. El biogás es el combustible que mueve una turbina y genera aproximadamente 1.300 kW/h de energía eléctrica por millón de litros de aguas residuales tratadas (Burton, 1996 en Mo y Zhang, 2013). Un estudio a este respecto indica que si todas las PTAR de Texas utilizaran estos sistemas, se podría lograr una reducción del 26% del uso de electricidad en todo el estado (Stillwell y otros, 2010). La electricidad así producida es confiable y consistente, pero la instalación requiere costos de capital relativamente altos, unos USD \$4.500 /kW (Mo y Zhang, 2013). De otra parte, estos sistemas requieren de altos volúmenes de gas, por lo cual son viables únicamente para PTAR con un caudal superior a 231 l/s, o sea, 20 millones de litros diarios (*Ibid.*), lo que genera una población cercana a los 135.000 habitantes<sup>5</sup>; aunque estudios más recientes que emplean información de países de la región, se refieren a la existencia de una viabilidad financiera de estos esquemas de aprovechamiento de metano, en plantas que atienden poblaciones superiores a 300.000 habitantes (Silva y otros, 2016; Nolasco, 2010). Finalmente, se requiere contar con la capacidad técnica y profesional para operar estos sistemas. Por tanto, pese a que estos sistemas son altamente eficientes, tienen como limitantes los altos costos de inversión inicial, los mencionados altos volúmenes de aguas tratadas y el requerimiento de profesionales capacitados.

### c) Otras formas de generación de energía eléctrica

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales, y la digestión anaerobia de los lodos puede arrojar como un subproducto la generación de energía eléctrica y calórica, para lo cual existen distintos procesos, el más común de ellos utilizando el mismo biogás en la forma de metano. Otros métodos incluyen sistemas bioelectroquímicos, microalgas, hidroelectricidad y el proceso de incineración. A continuación, se resume cada uno de ellos y se evalúa su potencial para adoptarlos en una economía circular<sup>6</sup>.

**Sistemas bioelectroquímicos:** Los sistemas bioelectroquímicos utilizan catalizadores biológicos para producir reacciones químicas a partir de enzimas o microorganismos contenidos en las aguas residuales. Estos pueden almacenar la energía en celdas de combustible microbiana o de electrólisis

---

4 El uso de motores es 1,5 veces más eficiente que el de turbinas (Felca y otros, 2018)

5 Para una descarga media de 150 l/h/d

6 Otros sistemas existentes incluyen el uso de concentración solar para acelerar el proceso de secado de los efluentes y la instalación de paneles fotovoltaicos para el autoconsumo eléctrico de las PTAR, sin embargo, estos sistemas no se analizarán en este documento.

microbiana. En el primer caso la energía enzimática o microbiana se convierte directamente en electricidad (McCarty y otros, 2011; Mo y Zhang, 2013). La energía así obtenida varía entre 10-100 MW/m<sup>2</sup> (Liu y otros, 2004). Estos sistemas, además de producir energía de forma más eficiente, incluso más que en el caso del enfoque anaeróbico, reducen el exceso de lodos en alrededor de un 20% en comparación con el tratamiento convencional (Foley, 2010; McCarty y otros, 2011). Sus desventajas más notorias son la pérdida de energía durante el proceso de generación de electricidad, bajas tasas de utilización orgánica y costos de capital 800 veces mayores que un sistema anaeróbico (Liu y otros, 2004; McCarty y otros, 2011). En cuanto a los tratamientos de electrólisis microbiana, en ellos se recupera energía en la forma de bioquímicos, especialmente hidrógeno y metano. Es un sistema más reciente y cuenta con menos estudios que corroboren su eficiencia (Mo y Zhang, 2013).

**Microalgas:** La tecnología de microalgas recupera energía mediante el cultivo de estas pequeñas algas en el agua residual y su posterior conversión en productos energéticos. Esta técnica tiene un potencial de generación de energía de 2.600 kWh por tonelada de algas secas (Aresta y otros, 2005). Durante el cultivo, las microalgas absorben carbono y nutrientes de las aguas residuales, lo cual reduce la carga de desechos para su tratamiento. De otra parte, las microalgas utilizan el dióxido de carbono más rápido que los cultivos biológicos convencionales, lo que se traduce en una emisión negativa de gases de efecto invernadero de 51 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por cada kWh generado, con la consiguiente reducción y mitigación de las emisiones de dióxido de carbono (Groom y otros, 2008; Kumar y otros, 2010). Entre los desafíos para su mayor integración están los costos de cultivar las algas; los altos niveles de energía requeridos para la recolección, deshidratación y extracción de lípidos; y la identificación de las especies de microalgas con rendimientos óptimos (Kumar y otros, 2010; Mo y Zhang, 2013).

**Energía hidroeléctrica efluente:** La energía hidroeléctrica efluente utiliza turbinas u otros dispositivos instalados en tuberías, canales y ductos para generar electricidad a partir de aguas en movimiento. En el caso de las PTAR, estas tecnologías aprovechan los sistemas de conducción y el efluente de las aguas residuales mismas. Además de generar energía, los sistemas hidroeléctricos de este tipo pueden aumentar la concentración de oxígeno disuelto en las aguas residuales tratadas, favoreciendo con ello los procesos de tratamiento aeróbicos (Gaius-Obaseki, 2010). Su principal limitación es que requieren que el efluente tenga suficiente energía cinética o movimiento, lo que demanda una altura o caudal significativos (Ibíd.).

**Incineración para obtención de energía eléctrica:** Una forma de obtener este tipo de energía es la incineración, asociada a una planta de combustión que limite los desechos atmosféricos. El proceso consiste en transportar los lodos a un horno para que sirvan como combustible para generar energía eléctrica, lo cual al mismo tiempo reduce los desechos al mínimo (Mo y Zhang, 2013). Estos lodos se someten a un tratamiento de secado previo, ya que necesitan estar deshidratados para que sea más sencillo su almacenamiento y uso como combustible (Linares, 2020; Mo y Zhang, 2013). Una gran ventaja de esta técnica, que demanda poca inversión inicial, es que además de recuperar energía en lugar de utilizarla, permite extraer minerales de las cenizas: aproximadamente el 90% de fosfatos y otros metales (Hao y otros, 2020). Se calcula que al incinerar los biosólidos en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales en Texas se reduciría alrededor del 57% del consumo eléctrico del sector de aguas residuales de todo el estado (Stillwell y otros, 2010). Sin embargo, este procedimiento tiene un impacto negativo relevante pues apareja la emisión de compuestos orgánicos volátiles, tales como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), compuestos derivados del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y metales pesados (Linares, 2020). Por lo anterior, pese a que constituye una tecnología de reutilización de desechos, estas desventajas ambientales deben ser resueltas para responder a los principios de la economía circular.

### 3. Extracción de nutrientes

Un proceso que está tomando fuerza recientemente en el propósito de aprovechar las aguas residuales en línea con los principios de la economía circular, consiste en aprovechar los nutrientes que portan. Esto puede ser hecho directa y simplemente vertiendo a los suelos los lodos de las PTAR, o a través de sanitarios no convencionales que permiten la separación de la orina para su aplicación sobre el suelo, o bien con tecnologías de tratamiento de aguas residuales más sofisticadas, que permiten la recuperación del fosfato que contienen, o a través de la cristalización de estruvita para obtener el valioso fosfato. A continuación, se revisa cada una de estas técnicas y se exponen sus ventajas y desventajas para lograr su uso extendido.

Una primera forma de extraer los nutrientes de las aguas residuales consiste en esparcir los biosólidos en el suelo, previo su tratamiento por digestión, tratamiento alcalino, compostaje o secado. Su uso en tal forma es principalmente como fertilizante, lo cual reduce la dependencia de fertilizantes fósiles, aunque también pueden ser utilizados para el acondicionamiento del suelo y la cobertura de vertederos (Mo y Zhang, 2013). El uso de los biosólidos de esta forma representa una vía simple y rápida de obtener nutrientes, pero conlleva algunas inquietudes sociales y ambientales importantes, relacionadas con la salud y el olor que despiden (Ibid.).

Una segunda vía para recuperar nutrientes de las aguas residuales implica separar la orina, lo cual ya se realiza en algunas zonas rurales a baja escala. Este procedimiento disminuye, consecuentemente, la carga residual de las aguas en las PTAR, dado que la orina contiene alrededor del 75% del nitrógeno y 50% del fósforo de las aguas residuales domésticas. Se calcula que se podría recuperar cerca del 70% de estos nutrientes mediante inodoros recolectores (Mo y Zhang, 2013). La separación de la orina es altamente eficiente desde el punto de vista energético en comparación con otras tecnologías de reciclaje de nutrientes, además de que ofrece la posibilidad de recuperar los costos a través de su venta directa (Benetto y otros, 2009; Flores y otros, 2009; Larsen y otros, 2009). Dado que la separación suele ocurrir en el hábitat doméstico, estos sistemas se instalan en los hogares, lo que requiere el apoyo y participación de las comunidades locales, además de implicar el desafío de evitar la contaminación cruzada con heces (Mo y Zhang, 2013; Verstraete y otros, 2009). La recuperación de nitrógeno y fósforo a partir de la orina se reflejaría, entonces, en la merma de la labor y de los recursos de las PTAR, pero requiere de una coordinación y un sistema comunitario local sólidos.

Una tercera vía para recuperar nutrientes de las aguas residuales es la cristalización controlada de estruvita, que permite reciclar nutrientes de los licores del digestor de lodos. Esta técnica muestra altas tasas de recuperación de nutrientes, especialmente fosfato (Mo y Zhang, 2013), pues su concentración en los líquidos de digestión de lodos suele ser bastante alta, al punto que el potencial teórico de cristalización puede ser hasta de 67.000 toneladas de fertilizante por año solo en el Reino Unido (Gaterell y otros, 2011). Ahora bien, debido a que las fuentes de fosfato son acotadas y muchas están localizadas en países en constante conflicto político y social<sup>7</sup>, se ha registrado un aumento de más del 30% en sus precios a partir del año 2011 (y especialmente en 2022 con la guerra en Ucrania), lo que hace que la perspectiva de una recuperación rentable de este nutriente a partir de las aguas

---

7 Marruecos, Sahara Occidental, China, Egipto, Argelia, Siria, Brasil, Sudáfrica y Arabia Saudí concentran el 91% de las reservas mundiales (U.S. Geological Survey, 2021).

residuales sea atractiva económicamente (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kerres y otros, 2020; Rodríguez y otros, 2020), pues pese a que obtener fosfato de las aguas residuales es entre 2 y 8 veces más costoso que extraerlo de la roca, y a que la inversión en esta tecnología es alta, las tasas de recuperación a través de la venta del material pueden equilibrar tales costos, y a ello se sumarían los beneficios sociales y ambientales de reducirlos en forma de desechos.

## 4 BENEFICIOS ESPERADOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Con base en las distintas tecnologías presentadas, es evidente que hay que considerar las aguas residuales como un recurso y no como un desperdicio. Vistas así, y al adoptar los principios de la economía circular en lo que respecta al tratamiento de las aguas residuales municipales, es posible percibir múltiples beneficios, los cuales se detallan a continuación, clasificados por su carácter económico, ambiental o social.

### 4.1 Beneficios económicos directos

Se pueden listar los siguientes beneficios económicos:

- Venta de aguas tratadas. Es posible vender directamente las aguas residuales parcialmente tratadas, a un valor menor que el de las aguas totalmente tratadas. Y si bien los bajos costos del agua dulce hacen difícil que se pueda cobrar un precio adecuado por las aguas recuperadas, hay un ejemplo de práctica exitosa en este sentido llevada a cabo en Honolulu, Hawái (Lazarova y Asano, 2013). Allí se vende agua de dos tipos, según el usuario al que van dirigidas. Un primer tipo se deriva al sector industrial de la isla, que incluye refinerías, fábricas y empresas de energía, todas ubicadas cerca de las instalaciones donde se trata. Estos usuarios reciben el agua tratada y luego procesada por ósmosis inversa, con lo cual se logra un agua de alta pureza y calidad. Un segundo tipo se deriva hacia campos de golf, jardinería y riego, y se vende más barato ya que no es sometida al proceso de ósmosis inversa. Los volúmenes de agua producidos por este sistema y comercializados desde su creación en 2000 han aumentado continuamente, al punto que en 2012 su volumen fue de 11,5 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales el 17% era agua de alta pureza para fines industriales y un 83% se destinó al riego. Como es de suponer, considerando la creciente escasez de agua y la incertidumbre sobre su disponibilidad, el requerimiento de estas aguas y su valor tienen un potencial creciente.
- Swaps, o transferencias intersectoriales de agua. A diferencia de la venta, aquí se lleva a cabo un intercambio comercial de fuentes de abastecimiento de agua, lo cual se traduce en un ahorro o beneficio económico directo. Por ejemplo, es posible pactar acuerdos entre los productores de agua tratada para el riego y los productores de agua dulce para usos domésticos e industriales (Winpenny y otros, 2010). Este modelo puede aplicarse en intercambios de agua entre usuarios con baja demanda de calidad hídrica y usuarios de mayor consumo, con requerimientos específicos, que paguen por ella un mayor valor (WWAP, 2017). Con tal esquema, pese a que estos *swaps* no aumentan la disponibilidad total del recurso, permiten un ahorro en comparación con el costo de acudir a otras fuentes hídricas como el tratamiento y filtrado de aguas superficiales escasas, así como el profundizar pozos, con todo el gasto energético que entraña el uso de fuentes subterráneas.
- Venta de biogás. Es posible comercializar biocombustibles obtenidos a partir de las microalgas y de los procesos bioquímicos, o bien en forma de biogás. Estos biocombustibles

pueden ser utilizados para el transporte, el desarrollo de bioplásticos y bioquímicos, como complementos nutricionales para humanos y animales, como antioxidantes e ingredientes cosméticos (WWAP, 2017). En cuanto al metano, en la planta de tratamiento de aguas residuales de La Farfana en Santiago, Chile, se han generado beneficios de USD \$1 millón anuales por su venta directa (Rodríguez y otros, 2020). La planta trata anualmente entre 222 y 289 millones de metros cúbicos de aguas residuales y produce un promedio de 25 millones de metros cúbicos de biogás (World Bank, 2020b). Únicamente a través de su venta, se estima que en menos de tres años lograrán recuperar la inversión realizada de USD \$2,7 millones para modernizar la planta e incorporar esta tecnología (Rodríguez y otros, 2020). A lo anterior se suma la reducción de emisiones de GEI. Aquí se calcula que el sistema reduce en 19.788 toneladas la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente al año, una fuente potencial de ingresos adicionales si se considera la venta de bonos de carbono (World Bank, 2020b). Asimismo, la compañía de gas con la cual se suscribieron los contratos de compraventa ahorró un estimado de USD \$1,6 millones al comprar este biogás en lugar de sus fuentes convencionales (Ibíd.).

- Venta de fertilizantes y ahorro en desechos. La comercialización de subproductos es la vía que por lo común utilizan las PTAR para recuperar sus costos, y ello incluye fertilizantes como el fósforo, el nitrógeno y los biosólidos. La empresa de agua de Nuevo Cairo, Egipto, vende los lodos a la industria del cemento y a la agricultura, con lo cual obtiene un flujo de ingresos adicional (World Bank, 2020a). Por su parte, la planta de La Farfana, en Chile, con una producción de 800 ton/día de lodos, entrega estos biosólidos a los agricultores de forma gratuita, con lo cual se ahorra los costos por el depósito de biosólidos en vertederos, que asciende a USD \$40/ton, lo que sumaría anualmente USD \$11,6 millones (World Bank, 2020b).
- Venta de fosfato. La extracción y venta del fosfato tiene un creciente potencial económico, debido a que en los próximos cincuenta a cien años las fuentes minerales de donde se extrae el mineral serán escasas o se habrán agotado (Van Vuuren y otros, 2010). La empresa Ostara Company de Canadá recupera el fosfato como gránulos, llamados *crystal green*, y los ingresos obtenidos por la venta de este fertilizante son compartidos con la ciudad para compensar los costos de las instalaciones.
- Reducción de costos. Primeramente, y como ya se ha mencionado, el impulsar la economía circular en las PTAR se traduce en una reducción de costos debido a la disminución de desechos y la consecuente minimización de los costos de su disposición. Asimismo, los tratamientos anaeróbicos, además de utilizar menos energía, la generan, permitiendo también el consecuente ahorro energético. Finalmente, merman los costos vinculados al uso de aguas de fuentes naturales. En un sistema sanitario rural de San Pedro de Potosí, en México, se estimó una reducción de un 33% de los costos por reutilización de las aguas, lo que representa un ahorro de USD \$3 millones anuales en energía y ayudó a cubrir los costos de operación y mantenimiento de la empresa de agua (Rodríguez y otros, 2020).
- PIB y comercio. El agua contaminada puede afectar directamente las actividades económicas que utilizan el agua, como la producción industrial, la pesca, la acuicultura y el turismo (PNUMA, 2016). Además, puede limitar indirectamente la exportación de ciertas mercancías debido a las restricciones, e incluso a la prohibición, de comercializar productos contaminados (WWAP, 2017). Se calcula que por cada USD \$1 gastado en saneamiento el retorno es de USD \$5,5 (Hutton y Haller, 2004, en WAAP, 2017). En tal sentido, además de motivar el comercio, la inversión en sistemas de tratamiento de aguas que se basen en los principios de la economía circular puede generar beneficios en el PIB y el desarrollo de los países.

## 4.2 Beneficios Ambientales

Además de los beneficios económicos mencionados, el impulsar una economía circular en el tratamiento de aguas residuales conlleva beneficios ambientales. Entre los más significativos se encuentran:

- Mitigación del cambio climático. Cuando se desechan las aguas residuales en cuerpos de agua superficiales aumenta la cantidad de nutrientes y materia orgánica en su caudal, lo cual propicia aún más la emisión de GEI (Kerres y otros, 2020). La aplicación de la economía circular en su tratamiento disminuye estas emisiones. En igual sentido, al remplazar el uso de gas licuado por el metano y reducir el uso de leña como combustible es posible disminuir sustancialmente estas emisiones (Cornejo y Wilkie, 2010). En suma, la ampliación de la capacidad de tratamiento del agua con el enfoque de la economía circular se traduce en un efecto positivo en las emisiones de GEI, en especial del metano, porque se reducen las aportaciones de materia orgánica y nutrientes a los cuerpos de agua superficiales y de GEI a la atmósfera. Ello representa una eficaz contribución a los esfuerzos nacionales de mitigación del cambio climático.
- Protección de la calidad del agua. El vertido de aguas residuales no tratadas en el medio ambiente tiene un impacto negativo en la calidad del agua. Esto, a su vez, afecta la cantidad de recursos hídricos de calidad disponibles para uso directo.
- Salvaguarda de los ecosistemas acuáticos. Al tratar las aguas residuales con base en el paradigma de la economía circular, se minimizan los desechos emitidos a los cuerpos de agua. La eutrofización<sup>8</sup>, impulsada por el exceso de nitrógeno y fósforo, puede provocar floraciones de algas potencialmente tóxicas, así como la disminución de la biodiversidad (WWAP, 2017). Al reducir el desecho de estos nutrientes a fuentes naturales y en su lugar reinsertarlo en los procesos agrícolas, se reduce el riesgo de que afloren estas formaciones de algas. En cuanto a los vertidos en mares y océanos, se estima que ya se han afectado 245.000 km<sup>2</sup> de ecosistemas marinos, con repercusiones en la industria pesquera, en los medios de vida y en las cadenas alimenticias (*Ibid.*). Al extraer estos nutrientes de las aguas tratadas se minimizan los efectos inmediatos de esta contaminación y el consecuente deterioro de los ecosistemas acuáticos.
- Incremento de la sostenibilidad energética. Al incrementar el uso de metano de las aguas residuales y dado que su disponibilidad es proporcional al crecimiento poblacional, se refuerza la sostenibilidad del sistema. Asimismo, se diversifica la matriz energética y disminuye la participación de energías ambientalmente dañinas, como la derivada del carbón y la leña.

---

8 En la región, hay 31 áreas con eutrofización y 19 áreas con hipoxia (llamadas "muertas", porque el déficit de oxígeno ha terminado con la biodiversidad local), con una mayor concentración en el Atlántico que en el Pacífico (CEPAL, 2022)

### 4.3 Beneficios Sociales

Los efectos favorables de adoptar un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas servidas se reflejan relevantemente en la sociedad. Entre los principales beneficios de este tipo destacan:

- Mejoras en la salud pública. La gestión eficiente de los residuos humanos aporta indudables beneficios a la sociedad, en especial en materia de salud pública. Al disminuir los desechos emitidos a los cuerpos de agua disminuyen consecuentemente las enfermedades transmitidas por el suministro de agua dulce contaminada (WWAP, 2017), como el cólera, diversas diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. De hecho, se estima que unas 842.000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua (Mills y Cumming, 2016).
- En 2014 se estimó que en la región se habían perdido 5,7 millones de años de vida ajustados en función de discapacidad debido a dichas enfermedades, los cuales fueron valorados en 1.800 millones de dólares (DalalSvanström, 2015). Por supuesto, esto repercute a largo plazo en el bienestar de las comunidades y en sus medios de subsistencia.
- Generación de empleos verdes. Se produce un efecto inicial benéfico en la generación de empleo cuando se inician las actividades para implementar la economía circular en el tratamiento de las aguas residuales. En países de distintos niveles de desarrollo siempre hay una relación entre la gestión del agua en general y las oportunidades de empleo. En otras palabras, el agua desempeña un papel clave en la generación y el mantenimiento de empleos directos en una amplia gama de sectores, y todos aquellos que surgen por su efecto multiplicador (WWAP, 2017).

## 5 CONCLUSIONES

La revisión de literatura propuesta en este capítulo, y las múltiples opciones que se han documentado para la implementación de la circularidad en el tratamiento de las aguas residuales, evidencia el amplio potencial que existe en la materia, y en particular en ALC, si se toma en cuenta la situación actual del tratamiento de las aguas residuales en la región.

De las posibilidades detalladas, aquella que presenta mejores perspectivas para ALC es la generación de energía que toma en cuenta el aprovechamiento del metano. Primeramente, esta tecnología puede resultar menos costosa que los sistemas bioelectroquímicos, así como puede configurar menores desafíos que la generación de energía a partir de microalgas. A su vez, si bien alternativas como la incineración para obtención de energía eléctrica pueden presentar viabilidad económica y técnica, su impacto en la emisión de compuestos orgánicos volátiles configura afectaciones ambientales importantes que se contraponen con los principios de la economía circular. En cuanto a la extracción de nutrientes, los sistemas de separación de orina presentan importantes restricciones que dificultan alcanzar economías de escala. Asimismo, el sistema de cristalización controlada de estruvita implica altos costos que se reflejan en la insostenibilidad financiera de su implementación en la región.

En contraste, existe literatura relevante y que ha documentado la viabilidad financiera de implementar sistemas de aprovechamiento de metano y cogeneración de energía, en PTARs que atienden poblaciones superiores a 300 mil habitantes, lo que implica un amplio potencial para la implementación de este tipo de tecnologías en ciudades intermedias.

A su vez, la implementación de la circularidad a partir del aprovechamiento de metano presenta importantes beneficios sociales, ambientales y económicos, que se dan, en la medida en que dicho esquema no es excluyente y permite el desarrollo de circularidad en otras áreas del tratamiento de las aguas residuales, tales como la utilización de los lodos residuales como fuente de nutrientes para la actividad agrícola (como en el caso de la PTAR la Farfana en Chile, y Nuevo Cairo en Egipto), la comercialización de aguas residuales tratadas para riego o generación de calor y frío; y como componente central permite la reducción de emisiones GEI, a partir de la reducción de las emisiones del metano que se genera en las PTAR, y de la cogeneración de energía que puede ser empleada por las PTAR en los procesos internos, e incluso, pueden generarse excedentes, que implícitamente presentan el beneficio de sustituir energía proveniente de la matriz energética nacional (que suele contener fuentes de energía no renovables), por energías renovables.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, I. y P. Blanco (2018), "Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México", *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 9, N° 2.
- Aresta, M., A. Dibenedetto y G. Barberio (2005), "Utilization of macro-algae for enhanced CO<sub>2</sub> fixation and biofuels production: Development of a computing software for an LCA study", *Fuel Processing Technology*, vol. 86, N° 14.
- Arnabat, I. (2017), "Bomba de calor para ACS a partir de fuentes de calor residual", [en línea], <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor-para-ac-s-fuentes-calor-residual.html>
- Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (2019), "Indicadores de Desempeño de las EPSA Reguladas Categorías A, B, C, D 2019", Ministerio de Medio Ambiente y Agua, La Paz, Bolivia.
- Báez, P.A. y otros (2016), "Evidencia de circulación del virus de la hepatitis A, subgenotipo IA, en muestras ambientales en Antioquia, Colombia", *Biomédica*, vol. 36.
- Banco Central de Costa Rica (2021), "Cuenta de Agua", Área de Estadísticas Ambientales, San José, Costa Rica.
- Barbier, E. (2020), "Greening the Post-pandemic Recovery in the G20", *Environmental and Resource Economics*, vol. 76.
- Benetto, E., D. Nguyen, T. Lohmann y B. Schmitt (2009), "Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment", *Science of The Total Environment*, vol. 407, N° 5.
- Brennan, G., M. Tennant y F. Blomsma (2015), "Business and production solutions: closing loops and the circular economy".
- Briseño, H. y J. Rubiano (2018), "El servicio de agua potable para uso residencial en Colombia", *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, vol. 21, N° 1.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2012), "Cambio estructural para la igualdad: una visión integrada del desarrollo. Trigésimo cuarto período de sesiones de la CEPAL", Naciones Unidas, San Salvador, El Salvador.
- \_\_\_\_\_ (2019), Producto interno bruto (PIB) total anual a precios constantes en dólares [Conjunto de datos]. Cuentas nacionales anuales en dólares, CEPAL, [en línea], <https://cepalstat-prod.cepal.org/cepalstat/tabulador/ConsultaIntegrada.asp?IdAplicacion=6&idTema=131&idIndicador=2204&idioma=e>.
- \_\_\_\_\_ (2021), "La paradoja de la recuperación en América Latina y el Caribe. Crecimiento con persistentes problemas estructurales: desigualdad, pobreza, poca inversión y baja productividad", *Serie Special report COVID-19 CEPAL*, vol. 11.
- \_\_\_\_\_ (2022), "Una década de acción para un cambio de época: Quinto informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe", Foro de los Países de América Latina y el Caribe sobre el Desarrollo Sostenible, CEPAL, N° 5, San José, Costa Rica.
- Comisión Nacional del Agua (2020), "Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento edición 2020", Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México.
- \_\_\_\_\_ (2020), "Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación", Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México.
- Comité Técnico Interinstitucional Estadísticas del Agua (2021), "Boletín AGUA" CTI-Agua, [en línea], [http://www.da.go.cr/wp-content/uploads/2019/01/Boletin\\_Agua\\_2021\\_CTIEstadisticas.pdf](http://www.da.go.cr/wp-content/uploads/2019/01/Boletin_Agua_2021_CTIEstadisticas.pdf)
- Cornejo, C. y A. Wilkie (2010), "De Estiércol a Energía - Captura de Metano en Ecuador", *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*, vol. 23, N° 1.
- Dalal, K. y L. Svanström (2015), "Economic Burden of Disability Adjusted Life Years (DALYs) of Injuries", *Health*, vol. 57.
- Datos Abiertos (2021), Catálogo de plantas de tratamiento de aguas residuales en operación de CONAGUA [Conjunto de datos], CONAGUA, [en línea], <https://datos.gob.mx/busca/dataset/catalogo-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion-de-conagua/resource/4eee2614-ee68-4bc7-9698-22cd956c57c7>.
- Denton, F. y otros (2014), "Climate-Resilient Pathways: Adaptation, Mitigation, and Sustainable Development", en C. Field, V. Barros, D. Dokken, K. Mach, M. Mastrandrea y T. Bilir, "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2020), Producto Interno Bruto desde el enfoque de la producción a precios constantes [Conjunto de datos], Cuentas Nacionales Trimestrales, DANE, [en línea],

- <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/historicos-producto-interno-bruto-pib>.
- Dirven, M. (2019), "Nueva definición de lo rural en América Latina y el Caribe en el marco de FAO para una reflexión colectiva para definir líneas de acción para llegar al 2030 con un ámbito rural distinto. 2030", *Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina y el Caribe*, N° 2.
- División de Estadística de las Naciones Unidas (2021), Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura [Conjunto de datos], UNSTAT.
- EcoGreen Mundo (2015), "Diferencias entre la Economía Circular y la Economía Lineal", *EcogreenMundo*, [en línea], <https://ecogreenmundo.com/diferencias-entre-la-economia-circular-y-la-economia-lineal/>.
- Ellen MacArthur Foundation (2013), "Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition", Ellen MacArthur Foundation, Cowes, Reino Unido, [en línea], <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.
- \_\_\_\_\_ (2015), "Delivering the Circular Economy, A Toolkit for Policymakers", Ellen MacArthur Foundation, Cowes, Reino Unido, [en línea], <https://emf.thirdlight.com/link/lzmolo7akk8k-hy6xla/@/preview/1?o>.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2021), "Overview of Greenhouse Gases", EPA, [en línea], <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CH4-reference>.
- Felca, A. y otros (2018), "Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source", *Sustainable Cities and Society*, vol. 41.
- Flores, A., C. Buckley y R. Fenner (2009), "Selecting Wastewater Systems for Sustainability in Developing Countries", *Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage*, Edimburgo, Reino Unido, [en línea], <https://www.researchgate.net/publication/267259999>.
- Foley, K. (2010), "Wastewater treatment and energy: an analysis on the feasibility of using renewable energy to power wastewater treatment plants in Singapore", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, United States of America, [en línea], <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/60765>.
- Fortuño, M. (2017), "La economía del agua: El futuro se acerca complicado", World Economic Forum, El Blog Salmón, [en línea], <https://es.weforum.org/agenda/2017/03/la-economia-del-agua-cada-vez-sera-mas-importante>.
- Gaius-Obaseki, T. (2010), "Hydropower opportunities in the water industry", *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 1, N° 3.
- Gasson, C. (2021), "Is net zero now water's biggest priority?", *Global Water Intelligence*, [en línea], <https://www.globalwaterintel.com/news/2021/32/is-net-zero-now-water-s-biggest-priority>.
- Gaterell, M. y otros (2011), "An Economic and Environmental Evaluation of the Opportunities for Substituting Phosphorus Recovered from Wastewater Treatment Works in Existing UK Fertiliser Markets", *Environmental Technology*, vol. 21, N°9.
- Ghisellini, P., C. Cialani y S. Ulgiati (2016), "A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems", *Journal of Cleaner Production*, vol. 114.
- GIZ (Deutsche gesellschaft für internationale zusammenarbeit) (2020), "Bombas de Calor. Una Guía para el Usuario", Bonn, Alemania, [en línea], <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/10/05150539/Gu%C3%ADa-Bombas-de-Calor.pdf>.
- González, R. y otros (2019), "Fecal pollution source tracking and thalassogenic diseases: The temporal-spatial concordance between maximum concentrations of human mitochondrial DNA in seawater and Hepatitis A outbreaks among a coastal population", *The Science of the Total Environment*, vol. 686.
- Gower, R. y P. Schröder (2016), "Virtuous Circle: How the Circular Economy Can Create Jobs and Save Lives in Low and Middle-income Countries", Tearfund and Institute of Development Studies, Londres, Reino Unido.
- Groom, M., E. Gray y P. Townsend (2008), "Biofuels and Biodiversity: Principles for Creating Better Policies for Biofuel Production", *Conservation Biology*, vol. 22, N° 3.
- Guzmán, F. (2019), "Cada vez son más frecuentes los florecimientos de algas nocivos", [en línea], <https://www.gaceta.unam.mx/cada-vez-son-mas-frecuentes-los-florecimientos-de-algas-nocivos/>.
- Hao, X. y otros (2020), "Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion", *Water Research*, vol. 170.
- Hernández, A. (2021), "Recuperación de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales" Reunión técnica Economía Circular, CEPAL.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020), "Anuario de estadísticas ambientales", INEI, Lima, Perú, [en línea], [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1760/libro.pdf)
- IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change) (2006), "Tratamiento y eliminación de aguas residuales", en IPCC, "Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero".

- IEA (International Energy Agency) (2016), "Energy Efficiency Market Report 2016", International Energy Agency and OECD, Paris, Francia, [en línea], <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2016>
- JMP (Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation) (2021), "Rural and urban service levels, 2015 and 2020", [en línea], <https://washdata.org/data/household#!/>.
- Kerres, M. y otros (2020), "Stop Floating, Start Swimming. Water and climate change. Interlinkages and prospects for future action", Bonn/Eschborn, Alemania, [en línea], <https://www.adelphi.de/en/publication/stop-floating-start-swimming>.
- King, A. M., S. C. Burgess, W. Ijomah y C. A. McMahon (2006), "Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?", *Sustainable development*, vol. 14, Nº 4.
- Kumar, A. y otros (2010), "Enhanced CO<sub>2</sub> fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions", *Trends in Biotechnology*, vol. 28, Nº 7.
- Larsen, T. y otros (2009), "Source Separation: Will We See a Paradigm Shift in Wastewater Handling?", *Environmental Science and Technology*, vol. 43, Nº 16.
- Lazarova, V. y T. Asano (2013), "Milestones in Water Reuse", London, United Kingdom, Knowledge Unlatched, [en línea], doi:<https://doi.org/10.2166/WRD.2011.000>.
- Leach, M., H. MacGregor, I. Scoones y A. Wilkinson (2021), "Post-pandemic transformations: How and why COVID-19 requires us to rethink development", *World Development*, vol. 138.
- Leverenz, H., G. Tchobanoglous y T. Asano (2011), "Direct potable reuse: a future imperative", *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 1, Nº 1.
- Linares, D. (2020), "Aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la generación de energía eléctrica", Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, [en línea], <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28585/2020danillinares.pdf?sequence=6>.
- Liu, H., R. Ramnarayanan y B. Logan (2004), "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell", *Environmental Science and Technology*, vol. 38, Nº 7.
- López, J., B. Ramírez, C. Gomes y J. Morgan-Sagastume (2017), "Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales", Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, Ciudad de México, México, [en línea], [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia\\_lodos\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf).
- McCarty, P., J. Bae y J. Kim (2011), "Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer, Can This be Achieved?", *Environmental Science and Technology*, vol. 45, Nº 17.
- Mejía, A., G. Uzcátegui y O. Valverde (2017), "Agua y saneamiento en el Estado Plurinacional de Bolivia", CAF, Buenos Aires, Argentina.
- Méndez, J. y J. Marchán (2008), "Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución", SUNASS, Lima, Perú.
- Mills, J. E. y O. Cumming (2016), "The impact of water, sanitation and hygiene on key health and social outcomes", Sanitation and Hygiene Applied Research for Equity (SHARE) and UNICEF.
- Mo, W. y Q. Zhang (2013), "Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants", *Journal of Environmental Management*, vol. 127.
- Moglia, M. y otros (2021), "Accelerating a green recovery of cities: Lessons from a scoping review and a proposal for mission-oriented recovery towards post-pandemic urban resilience", *Developments in the Built Environment*, vol. 7.
- Montesinos, R. y V. Martín (2020), "Economía circular y Objetivos de Desarrollo Sostenible", *Distribución y Consumo*, vol. 1.
- Moscoso, J. (2016), "Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas", Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú.
- Mulder, N. y M. Albaladejo (2020), "El comercio internacional y la economía circular en América Latina y el Caribe", *Serie Comercio Internacional CEPAL*, vol. 159, [en línea], [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46618/1/S2000783\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46618/1/S2000783_es.pdf).
- Nolasco, D. (2010), "Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residual", *Banco Interamericano de Desarrollo*, Nota Técnica Nº 116.
- Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2017), "Análisis geoespacial de canales de riego en relación a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y áreas verdes en el ámbito de Lima metropolitana", Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín, Lima, Perú.
- Peña, H. (2016), "Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales e Infraestructura CEPAL*, vol. 178.
- Peña-Guerrero, A. Nauditt, C. Muñoz-Robles, L. Ribbe y F. Meza (2020), "Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile" *Hydrological Sciences Journal*, vol. 65, Nº 6.

- Pistonesi, C., J. Haure y R. D'Elmar (2010), "Energía a partir de las aguas residuales", Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina, [en línea], [http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia\\_aguas\\_residuales/energia\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf).
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2016), "A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment", Reporte, N° DEW/1975/NA, Nairobi, Kenia.
- Potting, J., M.P. Hekkert, E. Worrell y A. Hanemaaijer (2017), "Circular economy: measuring innovation in the product chain", *Planbureau voor de Leefomgeving*, vol. 2544.
- Quirós, A. (2021), "Introducción a la Economía Circular y el desarrollo sostenible", Presentación para Módulo Seguridad Hídrica y Desarrollo del Curso Regional sobre Gobernanza del Agua y Seguridad Hídrica de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD).
- Rodriguez, D., H. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel (2020), "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", World Bank, Washington DC, United States of America, [en línea], <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative>.
- Rosa, C. (1998), "Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante", Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA), La Habana, Cuba.
- Ruiz, F. (2012), "Gestión de excretas y aguas residuales de Costa Rica. Situación actual y perspectiva", Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica, [en línea], <https://dspaceaya.igniteonline.la/bitstream/handle/aya/374/CEDO%20AyA%205051.pdf?sequence=1&isAlloWed=y>.
- Saravia Matus, S., M. Gil, E. Blanco, A. Llavona y L. Naranjo (2020), "Desafíos hídricos en Chile y recomendaciones para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales y Desarrollo CEPAL*, vol. 198.
- Saravia Matus, S., M. Gil, N. Sarmanto, E. Blanco, A. Llavona y L. Naranjo (2022), "Brechas, Desafíos y Oportunidades de Agua y Género en América Latina y el Caribe", *Serie Recursos Naturales y Desarrollo CEPAL*.
- Schady, N. (2015), "Does Access to Better Water and Sanitation Infrastructure Improve Child Outcomes? Evidence from Latin America and the Caribbean", *Inter-American Development Bank, IDB Working Paper Series*, N° IDB-WB-603.
- Schröder, P., K. Anggraeni y U. Weber (2019), "The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, N° 1.
- Sihvonen, S. y T. Ritola (2015), "Conceptualizing ReX for aggregating end-of-life strategies in product development", *Procedia Cirp*, vol. 29.
- Silva, I., R. Mambeli y G. Tiago (2016), "Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment Plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential", *Journal of Cleaner Production*, vol. 126.
- Sistema Único de Información (2021), Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales [Conjunto de datos]. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, [en línea], <http://www.sui.gov.co/web/alcantarillado/reportes/tecnico-operativos/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales>.
- Srinivas, H. (2021), "Moving towards a Circular Economy: More than Just 3Rs!", *Global Development Research Center, Concept Note*, vol. E-097.
- Stillwell, A., D. Hoppock y M. Webber (2010), "Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus", *Sustainability*, vol. 2, N° 4.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2020), "Estudio sectorial de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado – 2019", Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá, Colombia.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (1985), "Estimating Sludge Management Costs". Cincinnati Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Ohio, United States of America.
- United States Geological Survey (2021), "Mineral Commodity Summaries", Reston, Virginia, United States of America.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2021), "Precios de energía eléctrica, comparación por países", [en línea], <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/precios-energia-electrica-comparacion-paises.aspx>
- UNEP (United Nations Environment Program) (2012), "Global outlook on Sustainable Consumption and Production Policies (SCP). The Global Outlook on SCP Policies. Taking action together", United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya, [en línea], [www.unep.fr/scp/ISBN:978-92-807-3250-4DTI/1498/PA](http://www.unep.fr/scp/ISBN:978-92-807-3250-4DTI/1498/PA).
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017), "UN World Water Development Report 2017. Wastewater: An untapped resource", WWAP, Paris, France, [en línea], <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2017/>.
- Van Vuuren, D., A. Bouwman y A. Beusen (2010), "Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion", *Global Environmental Change*, vol. 20, N° 3.

- Velenturf, A. y P. Purnell (2021), "Principles for a sustainable circular economy", *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27.
- Verstraete, W., P. Van de Caveye y V. Diamantis (2009), "Maximum use of resources present in domestic used water", *Bioresource Technology*, vol. 100, N° 23.
- Von Sperling, M. (2005), "Princípios do tratamento biológico de águas residuárias", Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, [em línea], <https://www.worldcat.org/title/principios-do-tratamento-biologico-de-aguas-residuarias/oclc/77543218>
- Winpenny, J. y otros (2010), "The wealth of waste. The economics of wastewater use in agriculture", FAO, [en línea], <https://www.fao.org/publications/card/es/c/dfbc90b-9851-5862-8a86-ofecad117835/>.
- World Bank (2020a), "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of New Cairo, Egypt", en Rodriguez, D. J., H. A. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel, "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", *Water Global Practices*, Washington DC, United States of America.
- \_\_\_\_\_ (2020b) "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of Santiago, Chile", en Rodriguez, D. J., H. A. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco y G. Saltiel, "From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean", *Water Global Practices*, Washington DC, United States of America.