

Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravia Matus
Diego Fernández
Antonio Santos
Pedro Chavarro
Alfredo Montañez
Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

SERIE

RECURSOS NATURALES

222

Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravia Matus
Diego Fernández
Antonio Santos
Pedro Chavarro
Alfredo Montañez
Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Silvia Saravia Matus, Oficial de Asuntos Económicos de la Unidad de Agua y Energía de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Diego Fernández, Antonio Santos, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto, Consultores de la misma Unidad, en el marco de las actividades del proyecto CEPAL/GIZ: "Reactivación transformadora: superando las consecuencias de la pandemia de COVID-19 en América Latina y el Caribe". El proyecto es ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Los autores agradecen los insumos de Romeo Moers, Consultor de la Unidad de Agua y Energía de la División de Recursos Naturales de la CEPAL.

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

No deberá entenderse que existe adhesión de las Naciones Unidas o los países que representan a empresas, productos o servicios comerciales mencionados en esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas incluidos en este documento no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN: 2664-4541 (versión electrónica)
ISSN: 2664-4525 (versión impresa)
LC/TS.2024/36
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2024
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2400446[S]

Esta publicación debe citarse como: S. Saravia Matus y otros, "Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe", *serie Recursos Naturales y Desarrollo*, N° 222 (LC/TS.2024/36), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	13
Introducción	15
I. Estado de avance en el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe: análisis de Inversiones y perspectivas de economía circular	17
A. Estado de avance y necesidades de inversión para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe	17
B. Economía circular para el cumplimiento del ODS 6 y la reducción de emisiones	20
1. El metano	21
2. Los nutrientes: un recurso estratégico y un grave problema ambiental	23
II. Viabilidad económica del aprovechamiento de metano en PTAR con capacidades menores a 500 l/s: casos de estudio en México y El Salvador	27
A. Metodología empleada en la estimación de emisiones de metano en el tratamiento de aguas residuales	28
B. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de El Salvador	29
1. Caracterización general de las PTAR	29
2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica	31
3. Estimación de los costos de inversión	32
4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano	34
5. Beneficios ambientales y sociales del aprovechamiento del metano	34
C. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de México	36
1. Caracterización general de las PTAR	36
2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica	41
3. Estimación de los costos de inversión	43
4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano	45
5. Beneficios ambientales y sociales del aprovechamiento del metano	47

III.	Potencial de recuperación de nutrientes en PTAR de América Latina y el Caribe	51
A.	Marcos normativos para la descarga y el aprovechamiento de nutrientes de aguas residuales	52
1.	Tendencia hacia una normativa más rígida sobre descargas de nutrientes	52
2.	Marco normativo para la aplicación de biosólidos de PTAR en suelos agrícolas	55
3.	Marcos normativos para el uso de sales de fosfato precipitadas en PTAR como fertilizantes	59
B.	Alternativas para la recuperación de nutrientes en plantas de tratamiento de aguas residuales	59
1.	Recuperación de nutrientes mediante el aprovechamiento de biosólidos	59
2.	Recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita	60
C.	Viabilidad de la implementación de sistemas de precipitación de estruvita en PTAR de Bogotá, Panamá y San Salvador	67
1.	Caso Bogotá	67
2.	Caso Panamá	72
3.	Caso San Salvador	75
IV.	Mecanismos para el financiamiento de proyectos de economía circular en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe	79
A.	Financiamiento tradicional en el sector de AyS en América Latina y el Caribe	81
B.	Financiamiento climático y sostenible para proyectos de economía circular en AyS en América Latina y el Caribe	81
1.	Los fondos climáticos	84
2.	Mercados de carbono	94
3.	Banca multilateral	96
4.	Bonos temáticos	99
C.	Otras alternativas de financiamiento	100
1.	Los bancos nacionales de desarrollo	100
2.	Fondos revolventes	100
3.	Fondo Azure	103
D.	Barreras y recomendaciones para el financiamiento de proyectos de economía circular en el sector de AyS en América Latina y el Caribe	103
1.	Construcción de capacidades para acceder a fondos climáticos	104
2.	Formulación de Proyectos para el GCF y el GEF	104
3.	Aprovechar posibilidades del financiamiento combinado para movilizar capital privado	105
4.	Fondos revolventes: una solución multiplicadora de financiamiento sectorial	105
V.	Conclusiones	107
A.	Aprovechamiento energético del metano: oportunidades rentables en PTAR de pequeña y mediana escala	107
B.	Oportunidades de recuperación de nutrientes: perspectivas actuales y futuras	108
C.	Alternativas para el financiamiento de proyectos de economía circular en el sector de AyS en América Latina y el Caribe	109
	Bibliografía	111
	Anexos	119
	Anexo A1	120
	Anexo A2	121
	Anexo A3	122
	Anexo A4	123

Anexo A5	124
Anexo A6	126
Anexo A7	128
Serie Recursos Naturales y Desarrollo: números publicados	130

Cuadros

Cuadro 1	Características generales de las PTAR de estudio en El Salvador	30
Cuadro 2	Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas de El Salvador.....	31
Cuadro 3	Potencial energético de las PTAR analizadas en El Salvador	32
Cuadro 4	Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en El Salvador	32
Cuadro 5	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de El Salvador.....	34
Cuadro 6	Reducción de emisiones en las PTAR de estudio de El Salvador.....	35
Cuadro 7	Impacto de las inversiones sobre el valor agregado bruto en El Salvador.....	36
Cuadro 8	Impacto de las inversiones sobre el empleo en El Salvador.....	36
Cuadro 9	Características generales de las PTAR de estudio en México	37
Cuadro 10	Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas de México	41
Cuadro 11	Potencial energético de las PTAR analizadas en México	42
Cuadro 12	Potencial energético de las PTAR analizadas en México utilizando el 80% de su capacidad instalada.....	43
Cuadro 13	Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de México	43
Cuadro 14	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de México	45
Cuadro 15	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de México suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada	46
Cuadro 16	Reducción de emisiones en las PTAR de estudio de México.....	48
Cuadro 17	Impacto de las inversiones sobre el valor agregado bruto en México.....	49
Cuadro 18	Impacto de las inversiones sobre el empleo en México.....	49
Cuadro 19	Valores máximos permisibles de N y P en las descargas de efluentes a cuerpos receptores.....	53
Cuadro 20	Valores máximos permisibles para contenido de metales en lodos	56
Cuadro 21	Tasa máxima anual permitida para aplicación de lodos en suelos	58
Cuadro 22	Cantidad máxima de metales acumulable en los suelos	58
Cuadro 23	Características de la estruvita como fertilizante	61
Cuadro 24	Características generales de las PTAR Salitre y Canoas	68
Cuadro 25	Planta de estruvita en la PTAR Salitre: costes de instalación y equipamiento (CAPEX), costes de operación (OPEX), e ingresos generados bajo el marco normativo actual	69
Cuadro 26	Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costos para las PTAR Salitre y Canoas en Bogotá	71
Cuadro 27	Características generales de las PTAR Juan Díaz, Arraiján Este y Caimito	72

Cuadro 28	Planta de estruvita en la PTAR Juan Díaz: costes de instalación y equipamiento (CAPEX), costes de operación (OPEX) e ingresos generados bajo el marco normativo actual	73
Cuadro 29	Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costo para la PTAR Juan Díaz	75
Cuadro 30	Características generales de las 3 nuevas PTAR proyectadas en El Salvador	75
Cuadro 31	Planta de estruvita en la PTAR proyectada para San Salvador, en Aguilares: costes de instalación y equipamiento (CAPEX), costes de operación (OPEX) e ingresos generados bajo el marco normativo actual	76
Cuadro 32	Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costo para la PTAR de Aguilares (San Salvador)	78
Cuadro 33	Principales fondos que financian acciones de mitigación a nivel global (2003-2021)	84
Cuadro 34	Asignación de recursos del GEF-8 (2022-2026)	91
Cuadro 35	Asignación teórica para la programación por países de Programas Integrados (IP)	93
Cuadro A6.1	CAPEX-Costes de capital (equipamiento e instalación) para sistemas de precipitación de estruvita, en PTAR de tres tamaños diferentes	126
Cuadro A6.2	OPEX-Consumo de energía, insumos químicos y manutención para sistemas de precipitación de estruvita, en PTAR de tres tamaños diferentes	127
 Gráficos		
Gráfico 1	Cobertura de agua potable en 17 países de América Latina y el Caribe, 2022	18
Gráfico 2	Cobertura de saneamiento en 17 países de América Latina y el Caribe, 2022	19
Gráfico 3	Emisiones globales de CH ₄ , 2022	21
Gráfico 4	Porcentaje de fertilizante importado respecto al consumido en países de América Latina y el Caribe, 2020	24
Gráfico 5	Costo de inversión por cada MWh/año de energía eléctrica generable en PTAR de El Salvador	33
Gráfico 6	Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de las PTAR de El Salvador	33
Gráfico 7	Costo de inversión por cada MWh de energía eléctrica generable en el año en PTAR seleccionadas de México	44
Gráfico 8	Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de PTAR seleccionada en México	45
Gráfico 9	Rango de valores máximos permisibles en las concentraciones de N de los efluentes descargados a cuerpos de agua receptores en países selectos de América Latina y el Caribe	55
Gráfico 10	Rango de valores máximos permisibles en las concentraciones de P de los efluentes descargados a cuerpos de agua receptores en países selectos de América Latina y el Caribe	55
Gráfico 11	Desglose del beneficio económico originado por sistemas de precipitación de estruvita-reactores de digestato	63
Gráfico 12	Desglose del beneficio económico originado por sistemas de precipitación de estruvita-reactores de centrado en PTAR con alrededor de 2.200 l/s de capacidad	63
Gráfico 13	Curvas de "sequedad de lodos vs. uso de polímero" en el proceso de deshidratación de lodos, con y sin reactor de estruvita instalado	65
Gráfico 14	Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Salitre	70

Gráfico 15	Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Canoas	71
Gráfico 16	Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Juan Díaz	74
Gráfico 17	Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR proyectada para San Salvador.....	77
Gráfico 18	Financiamiento climático para países en desarrollo 2013-2021, según tipo de fuente	83
Gráfico 19	Financiamiento climático para países en desarrollo 2013-2021, según categorías de financiamiento.....	84

Recuadros

Recuadro 1	Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París	82
Recuadro 2	Regiones y países receptores de financiamiento para la mitigación.....	85
Recuadro 3	Experiencias de financiamiento CTF en algunos países de la región	87
Recuadro 4	Experiencias de financiamiento GCF en algunos países de la región	90
Recuadro 5	Experiencias de financiamiento GEF en El Salvador, México y Panamá	93
Recuadro 6	Experiencias de financiamiento del Banco Mundial al sector de AyS en El Salvador.....	97
Recuadro 7	Experiencias de financiamiento del BID al sector de AyS en México	98
Recuadro 8	Experiencia de financiamiento de proyectos de AyS en América Latina y el Caribe a partir de bonos temáticos	99
Recuadro 9	Fondo revolvente de agua en Filipinas	101

Diagramas

Diagrama 1	Localización PTAR El Salvador	29
Diagrama 2	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en PTAR de estudio de El Salvador.....	31
Diagrama 3	Localización PTAR México	37
Diagrama 4	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en Planta San Martín de las Pirámides	38
Diagrama 5	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en Planta Centenario	39
Diagrama 6	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en Planta Bicentenario.....	40
Diagrama 7	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en Planta San Miguelito.....	41
Diagrama 8	PTAR de lodos activados con un sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato.....	61
Diagrama 9	PTAR de lodos activados con un sistema de precipitación de estruvita a partir de centrado	62
Diagrama 10	Ciclo de procesos para financiación de proyectos por el CTF	88
Diagrama 11	Temas prioritarios de financiación para el GCF	89
Diagrama A7.1	Ciclo de actividad de los proyectos/programas financiados por el GCF	128

Mapa

Mapa 1	Emisiones costeras de Nitrógeno en América	25
--------	--	----

Imágenes

Imagen 1	Incrustaciones de estruvita en las paredes internas de tuberías.....	64
Imagen 2	Incrustaciones de estruvita dentro de un digestor anaeróbico, PTAR de Saskatoon (Canadá).....	64

Siglas y acrónimos

AE	Accredited entities (entidades acreditadas)
ALC	América Latina y el Caribe
ANDA	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador
ASA	Autoridad Salvadoreña del Agua de El Salvador
ASC	Azure Source Capital
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations (Asociación de Naciones del Sudeste Asiático)
AyS	Agua y saneamiento
BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos de México
BEIF	Border Environmental Infrastructure Fund (Fondo de Infraestructura Ambiental Fronteriza)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BND	Banca nacional de desarrollo
CAEM	Comisión de Agua Potable del Estado de México
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina
CAPA	Comisión de Agua Potable de Quintana Roo
CAPEX	Capital expenditures (gastos de capital)
CER	Certificados de emisiones reducidas
CH₄D	Global Methane Reduction Platform for Development (Plataforma Mundial de Reducción del Metano para el Desarrollo)+
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua de México
COP 28	28ª Conferencia de las Partes de la CMNUCC
CRS	Catholic Relief Services (servicios de ayuda católica)
CTF	Clean Technology Fund (Fondo de Tecnología Limpia)

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DNA	Designated national authority (autoridad nacional designada)
DNSV	Dirección de Sanidad Vegetal de Panamá
DNTI	Dirección General de Normas y Tecnología Industrial de Panamá
DQO	Demanda química de oxígeno
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
FC	Financiamiento climático
FIDEAGUA	Fideicomiso para la Seguridad del Agua
FINDETER	Financiera de Desarrollo Territorial de Colombia
FP	Filtro Percolador
GBP	Green bond principles (principios de los bonos verdes)
GCF	Green Climate Fund (Fondo Verde del Clima)
GEEREF	Global Energy Efficiency and Renewable Energy Fund (Fondo mundial para la eficiencia energética y las energías renovables)
GEF	Global Environmental Facility (Fondo Mundial Ambiental)
GEI	Gases de efecto invernadero
GFMR	Global Flaring and Methane Reduction Partnership (Asociación Mundial para la Reducción de las Quemadas y el Metano)
ICMA	International Capital Market Association (Asociación Internacional del Mercado de Capitales)
IFC	International Finance Corporation (Corporación Financiera Internacional)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México
IP	Integrated programs (programas integrados)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
K	Potasio
LAC	Lodos Activados Convencionales
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento de Brasil
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
MDL	Mecanismo para un desarrollo limpio
MINAM	Ministerio de Medio Ambiente de Perú
Minvivienda	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia
MIP	Matrices insumo producto
MWh	Megavatio hora
N	Nitrógeno
NADB	North American Development Bank (Banco de Desarrollo de América del Norte)

NDC	Nationally Determined Contributions (contribuciones determinadas a nivel nacional)
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ODEAPAST	Organismo Público Descentralizado de Agua Potable, Alcantarillado, y saneamiento de Teotihuacan
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
OPEX	Operational expenditures (costos operativos)
P	Fósforo
PAC	Programa de Apoyo a Comunidades
PMR	Partnership for Market Readiness (Asociación para la preparación de mercados)
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
RAFA	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
RCDE	Regímenes de comercio de derechos de emisión
SBP	Social Bond Principles (principios de los bonos sociales)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina
SENASICA	Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria de México
SPO	Second party opinion (opinión de segunda parte)
SREP	Scaling Up Renewable Energy Program in Low Income Countries (Programa para el aumento del aprovechamiento de fuentes renovables de energía en países de bajos ingresos)
TIR	Tasa interna de retorno
UE	Unión Europea
UNEP	United Nations Environment Programme (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente)
UNSDG	United Nations Sustainable Development Group (Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible)
VPN	Valor presente neto

Resumen

Este documento se preparó con el objetivo explorar los beneficios potenciales que ofrece la gestión circular de las aguas residuales en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de América Latina y el Caribe (ALC), específicamente, en las actividades de aprovechamiento energético del metano generado en PTAR con capacidades inferiores a los 500 l/s, y de la recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita, en plantas con capacidades superiores a los 3.000 l/s.

Los resultados revelan que para hacer efectivo el aprovechamiento energético del metano en 7 PTAR de México y El Salvador, se debería realizar una inversión de USD 5,37 millones, que permitiría generar 8.077 MWh/año de energía eléctrica, con ahorros anuales de USD 1,35 millones. Estos ahorros permitirán recuperar la inversión en un plazo de 5,48 años, reducir las emisiones de CO₂ equivalente en 5.217 toneladas anuales, generar un aumento del valor agregado en USD 5,01 millones y la creación de 290 empleos directos e indirectos.

En cuanto a la precipitación de estruvita, se destaca el beneficio económico asociado a la disminución en el consumo de insumos químicos, tales como cloruro férrico o sulfato de aluminio, en contraste con otras alternativas de remoción de fósforo (P). Este documento subraya la viabilidad económica de la recuperación de nitrógeno (N) y fósforo (P) mediante la precipitación de estruvita, especialmente en PTAR con capacidades superiores a 3.000 l/s y en contextos regulatorios que impongan restricciones sustanciales a los vertimientos de P. Se verifica la viabilidad económica bajo marcos normativos que establezcan concentraciones máximas de P entre 4 mg/l y 5 mg/l.

Además de lo anterior, este documento se esfuerza por examinar exhaustivamente las principales fuentes de financiamiento disponibles para el sector de Agua y Saneamiento (AyS) con el propósito de respaldar iniciativas de esta índole. Aunque se resalta la presencia de notables oportunidades para acceder a financiamiento a través de fondos climáticos, la banca multilateral y la emisión de bonos temáticos, resulta imperativo poner de relieve las significativas posibilidades que la implementación de mecanismos como los fondos revolventes para el sector de agua y saneamiento a nivel nacional puede ofrecer, así como la adopción de esquemas de financiamiento combinado para PTAR de menor escala. Estas oportunidades quedan claramente ejemplificadas en casos exitosos como el fondo revolvente del agua en Filipinas y FIDEAGUA en El Salvador.

Estos mecanismos, además de facilitar una mayor movilización de recursos públicos y de financiamiento para el desarrollo hacia el sector de agua y saneamiento, también propiciarían una ampliación de los recursos provenientes de la banca comercial, la cual, hasta el momento, ha participado de manera limitada en el financiamiento de este sector.

En resumen, este documento concluye que la implementación de prácticas circulares no está limitada por barreras tecnológicas o financieras insuperables, sino más bien por la falta de capacitación y conocimiento sobre los recursos aprovechables de las aguas residuales, así como por la necesidad de reestructurar los modelos de financiamiento tradicionales en base a principios tecnológicos de la economía circular.

Introducción

El adecuado funcionamiento del sector de agua potable y saneamiento básico se erige como un elemento cardinal para el progreso de las sociedades. Esta premisa se fundamenta en el papel transversal desempeñado por el agua y el saneamiento en diversas actividades cotidianas, de tal modo que la carencia de acceso a tales servicios, o el acceso en condiciones inadecuadas, impacta de manera sustancial en la calidad de vida de los individuos. La pandemia de COVID-19, hizo evidente la importancia vital del saneamiento, la higiene y el acceso idóneo a agua limpia como medidas preventivas y de contención de virus y enfermedades.

Según el análisis de la Fundación AQUAE (2023), la estrecha interrelación entre agua y saneamiento y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), revela este sector como un eje central para abordar los desafíos de pobreza y desarrollo a nivel global. El acceso a agua y saneamiento, al mejorar las condiciones de vida, desempeña un papel destacado en la erradicación de la pobreza (ODS 1) y en la reducción de desigualdades (ODS 10). En el ámbito de la seguridad alimentaria (ODS 2), el agua desempeña una función crucial en la producción de alimentos, subrayando la imperante necesidad de su uso sostenible para lograr el hambre cero. Además, el tratamiento adecuado del agua se asocia directamente con la promoción de la salud, contribuyendo así a la reducción de enfermedades transmitidas por la contaminación (ODS 3) (íbidem).

En el ámbito educativo (ODS 4), el acceso adecuado al agua desempeña un papel clave en la disminución de la ausencia escolar. La limitación en el acceso al agua afecta de manera preponderante a mujeres y niñas, tanto por ser principalmente ellas las encargadas del acarreo del agua a las viviendas, sustrayéndolas parcial o totalmente del proceso educativo, como por la imposibilidad de acceder al aseo personal en su período menstrual, lo cual tiene consecuencias significativas en sus oportunidades de desarrollo incidiendo así positivamente en la equidad de género (ODS 5) (ONU Mujeres, 2018; Saravia Matus y otros, 2022b).

La implementación de una gestión circular del agua no solo posibilita acciones efectivas en adaptación y mitigación, como la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, fortaleciendo así la resiliencia de individuos y ecosistemas (ODS 13). Además, contribuye a la protección de la vida submarina (ODS 14), la preservación de ecosistemas terrestres (ODS 15) al logro de ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) (Fundación AQUAE, 2023), y al uso de aguas residuales como fuente de energía impacta directamente en el ODS 7 "Energía asequible y no contaminante". La UNSDG (2023) ha documentado

que las aguas residuales pueden proporcionar energía a 500 millones de personas, siendo un recurso inestimable que al estar compuesta en un 99,8% por agua (López y otros, 2017) podría suministrar más de diez veces el agua que proporciona la capacidad mundial actual de desalinización y compensar más del 10% del uso global de fertilizantes (ODS 2).

Es por lo anterior, que el cumplimiento del ODS 6 al 2030, registra un nivel de importancia superior para la región de América Latina y el Caribe (ALC) en su camino a disminuir radicalmente la pobreza antes del 2030. No obstante, son múltiples las voces que alertan sobre el retraso que registra la región de ALC en la materia (Brichetti y otros, 2021; Lentini, 2022; Saravia Matus y otros, 2023a). De hecho, desde CEPAL (2023) son más categóricos al afirmar que la tendencia favorable en los indicadores asociados a las metas 6.1 y 6.2, correspondientes al acceso al agua potable y el saneamiento gestionados de forma segura, no es suficiente para que pueda alcanzarse el acceso universal en 2030.

En este contexto, el presente documento propone una hoja de ruta para la implementación de dos tipos de proyectos de economía circular en PTAR de la región. Estos proyectos incluyen el aprovechamiento energético del metano generado en PTAR de bajas capacidades (inferiores a 500 l/s) y la recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita en PTAR con capacidades superiores a 3.000 l/s.

La estructura del documento se presenta de la siguiente manera: en primer lugar, se ofrece un análisis del progreso de los países de ALC en la consecución del ODS 6 al 2030, destacando las oportunidades que brinda la economía circular para alcanzar dicho objetivo.

En el segundo capítulo, se examina la viabilidad económica y los posibles impactos ambientales y socioeconómicos de aprovechar el metano en la generación de energía eléctrica en PTAR con capacidades de tratamiento inferiores a 500 l/s. Este análisis se desarrolla utilizando como casos de estudio 7 PTAR ubicadas en México y El Salvador.

En el tercer capítulo, se aborda la viabilidad técnica y económica de la recuperación de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales en ALC, considerando las concentraciones máximas de nitrógeno y fósforo permitidas por las regulaciones actuales de los países, así como escenarios alternativos. Se analizan los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento (O&M), así como los beneficios económicos asociados a estas prácticas.

En el cuarto capítulo, en complemento a las oportunidades de aprovechamiento de metano y recuperación de nutrientes, se dedica especial atención al análisis de los diferentes mecanismos de financiamiento que pueden utilizarse para impulsar proyectos de economía circular en el sector de AyS, considerando la necesidad de movilizar recursos para la financiación de dichos proyectos.

Finalmente, el capítulo de conclusiones presenta recomendaciones para iniciar una trayectoria hacia la circularidad en el sector de AyS.

I. Estado de avance en el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe: análisis de Inversiones y perspectivas de economía circular

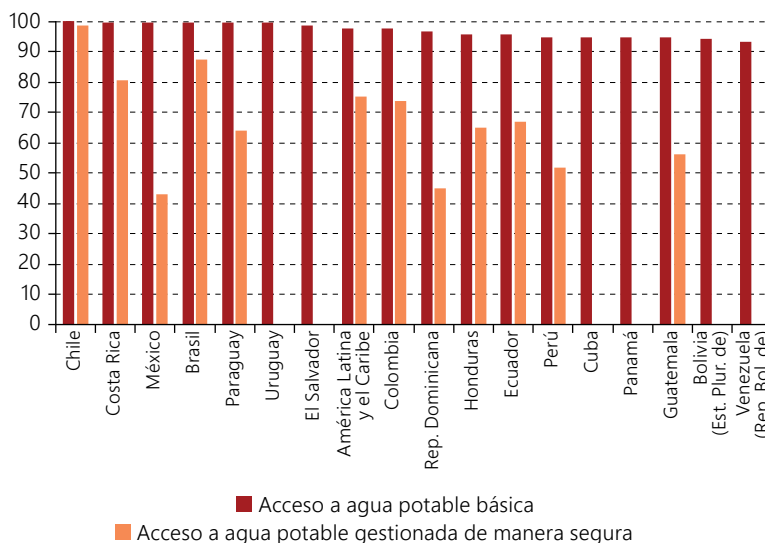
En este primer capítulo, se aborda el estado de avance en el cumplimiento del ODS 6 en ALC, utilizando datos recopilados por el Programa Conjunto de Vigilancia del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento (JMP). El análisis se centra específicamente en las coberturas básicas y seguras de agua potable y saneamiento en la región, con información actualizada hasta el año 2022. Asimismo, se examina la necesidad de inversiones para asegurar la cobertura universal antes de 2030, y se evalúan las oportunidades derivadas de la adopción de un enfoque de economía circular para abordar problemas ambientales como las emisiones de metano en las PTAR y la contaminación por nutrientes en las aguas residuales.

A. Estado de avance y necesidades de inversión para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe

Según el informe presentado por JMP (2023), la cobertura de agua potable en la región en 2022, a un nivel al menos básico, alcanza un promedio superior al 97,6% (91,6% en zonas rurales y 99% en zonas urbanas). Esto implica que aproximadamente 643 millones de personas tuvieron acceso a agua para consumo proveniente de fuentes mejoradas, ya sea dentro de su vivienda o a un lugar de suministro a una distancia caminando (ida, espera y vuelta) menor a los 30 minutos (JMP, 2020).

Sin embargo, para el 2022 el acceso a agua potable gestionada de manera segura —es decir de calidad, dentro de la vivienda y en forma permanente— solo benefició al 75% de la población total de la región, con niveles más bajos en zonas rurales (53%) en comparación con zonas urbanas (80%). Esto deja un desafío pendiente para asegurar el acceso a agua limpia, libre de contaminantes fecales y químicos, dentro de la vivienda y con garantía de suministro a aproximadamente 164 millones de habitantes en la región. (Ver gráfico 1).

Gráfico 1
Cobertura de agua potable en 17 países de América Latina y el Caribe, 2022
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, sobre JMP (Programa Conjunto de Vigilancia del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento), 2023.

En términos generales, se observa una disparidad significativa en la gestión segura del agua potable entre países. Chile, Brasil y Costa Rica destacan con niveles superiores al 80%, mientras que México, República Dominicana, Perú y Guatemala muestran niveles más bajos, incluso descendiendo al 43% en el caso de México, dentro de los países que cuentan con datos, ya que algunos países no cuentan con información sobre la gestión segura en el informe de JMP.

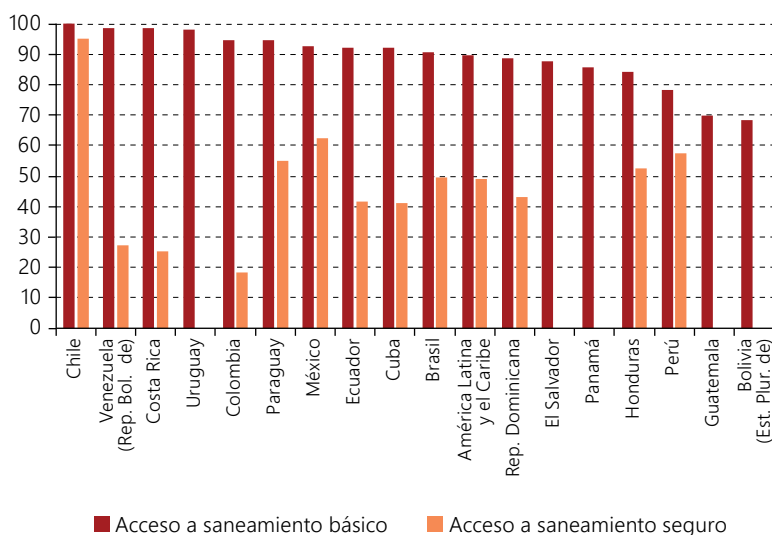
De acuerdo con Saravia Matus y otros (2023a), países como Honduras, El Salvador, México, Perú y República Dominicana quienes deben realizar los mayores esfuerzos para garantizar cobertura segura universal con corte al 2030, teniendo que destinar un monto de inversiones anuales, que asciende al 2,6%, 1,06%, 0,94%, 0,99% y 0,66% del PIB, respectivamente. En conjunto, la región debería destinar, en promedio, el 0,68% del PIB.

En cuanto al saneamiento, en 2022 la cobertura regional, a nivel básico, supera el 89,5% en promedio (74,6% en zonas rurales y 93,3% en zonas urbanas). Esto significa que, al menos 69 millones de personas carece de acceso a instalaciones mejoradas en su hogar (JMP, 2020); asunto que es urgente resolver, principalmente en las zonas rurales de países como el Estado Plurinacional de Bolivia y Guatemala y donde los niveles de cobertura en las zonas rurales son inferiores al 60%.

Sin embargo, cuando la medición se realiza a nivel de saneamiento gestionado de manera segura (sin impacto sobre el medio ambiente) la cobertura en la región es de solo el 49,17% de (JMP, 2023), lo que implica un reto significativo para garantizar el tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas por más de 330 millones de habitantes.

Como se evidencia en el gráfico 2, es Chile el único país que reporta un nivel de cobertura de saneamiento seguro, superior al 95%. Por otro lado, salvo por México, el resto de los países registra coberturas de saneamiento seguras, inferiores al 60%, lo que evidencia un atraso generalizado y notorio en el tratamiento de aguas residuales en la región. Es por ello, que, de acuerdo con Saravia Matus y otros (2023a), los países de la región deberán destinar sostenidamente durante 10 años un 0,71% de su PIB anual, en promedio, a inversiones en el sector, para garantizar una cobertura segura de saneamiento del 100%.

Gráfico 2
Cobertura de saneamiento en 17 países de América Latina y el Caribe, 2022
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia, sobre JMP (Programa Conjunto de Vigilancia del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento), 2023.

Diferentes investigadores estiman que la región se debe invertir el total, entre USD 373.890 millones y USD 698.000 millones (entre 0,5% y 1,38% del PIB regional en el período 2020-2030 para alcanzar el ODS 6: cobertura universal de los servicios de agua potable y saneamiento gestionados de manera segura (Bricchetti y otros, 2021; Lentini, 2022; Saravia Matus y otros, 2023a).

Sin embargo, de acuerdo con el análisis realizado por Lentini (2022) los niveles de inversión realizados entre 2015-2019 apenas ha alcanzado alrededor del 0,16% del PIB regional, lo cual denota la existencia de un importante descalce entre los recursos destinados por las naciones, y los recursos requeridos para el sector de AyS. Esta deficiencia en la inversión regional, aunque puede tener diferentes causas secundarias; tiene origen en bajas tarifas y restricciones presupuestales de los estados para compensarlas, dado que también deben enfrentarse a la demanda por esos recursos presupuestales de parte de otros sectores económicos, incluso con menor capacidad de generar recursos propios que el sector de agua y saneamiento.

Por ejemplo, en El Salvador —uno de los países con tarifas de agua y saneamiento más bajas de la región—, se ha identificado que aún las limitadas inversiones sectoriales realizadas entre el 2018 y el 2021, dependieron de manera predominante de los fondos de cooperación internacional, que representaron alrededor del 60% de tales recursos. Esto es preocupante, ya que la disminución en el flujo de tales recursos se refleja directamente en las inversiones del país en el sector de agua potable y saneamiento, como ocurrió en 2019 (Saravia Matus y otros, 2023c).

La fijación de tarifas demasiado bajas, que no permiten atender las necesidades de mantenimiento y mucho menos de inversión, de los sistemas, se configura en un obstáculo significativo para el cumplimiento del ODS 6. En el caso de El Salvador, con una tarifa combinada (agua más alcantarillado) de solo USD 0,32 por metro cúbico facturado, puede atribuirse a la autorización para fijar las tarifas la retiene directamente el poder ejecutivo nacional, así como a la carencia de una regulación tarifaria, factores que constituyen un fuerte incentivo para mantener las tarifas incluso por debajo de los costos de prestación del servicio (Saravia Matus y otros, 2023c).

Cuando el Estado y los operadores no pueden cubrir los costos de expansión del sistema, se enfrentan a dos alternativas: recurrir al mercado de financiamiento o, directamente, no llevar a cabo las obras. La existencia de una brecha entre la oferta comercial de financiamiento y la demanda del sector se convierte en una limitación importante, llevando en muchas ocasiones a la no realización de proyectos.

Esta brecha se origina debido a una mayor percepción de riesgo por parte de los financiadores. Incluso cuando las empresas del sector logran acceder a créditos, se enfrentan comúnmente al desafío de tener que amortizar el préstamo en un plazo de 5 a 10 años, mientras que los costos de inversión apenas pueden ser recuperados en períodos que oscilan entre 20 y 40 años. Además, la proliferación de un considerable número de operadores intermedios o que operan en pequeñas localidades, con capacidades financieras y técnicas limitadas, restringe aún más la viabilidad de llevar a cabo inversiones en el sector.

El déficit de inversión ha desembocado en bajos niveles de cobertura del servicio de agua potable gestionado de manera segura, y sobre todo, en una baja cobertura en el tratamiento de aguas residuales en la región. Esto implica que la región continuará enfrentando importantes impactos ambientales, como la contaminación de los cuerpos de agua, que a su vez conlleva consecuencias para la salud debido a la transmisión de patógenos por vía fecal-oral, así como el deterioro de ecosistemas habitados por organismos como peces y aves, pues tal como lo documentan Tuholske y otros (2021), existen puntos críticos de descarga de N en la desembocadura de al menos 13 importantes ríos de la región. Lo anterior, es especialmente grave si se considera que en ALC se concentra el 31% del agua dulce (FAO, 2022) y que la región aloja el 33% del total de mamíferos del mundo, el 35% de las especies de reptiles, el 41% de las aves y el 50% de los anfibios (UNEP, 2010).

B. Economía circular para el cumplimiento del ODS 6 y la reducción de emisiones

La limitada capacidad actual de inversión en la región demanda la creación de soluciones innovadoras que impulsen la consecución del ODS 6.

En este contexto, la economía circular se erige como el marco conceptual propicio y la herramienta práctica para la gestación de dichas soluciones. Su idoneidad deriva de la capacidad para aprovechar recursos que, en antaño, eran considerados desechos y que en, algunos casos conllevaban costos adicionales para la sociedad al requerir una disposición adecuada. La adopción de este enfoque en diversos sectores no solo resulta en la maximización de beneficios de los agentes directamente involucrados (productores y consumidores), sino que también aporta significativamente al bienestar socioeconómico y ambiental a escalas globales, nacionales y locales.

El sector de agua y saneamiento ejemplifica esta transición conceptual. Históricamente, las empresas consideraban el agua como un insumo para el servicio de agua potable a brindar mientras que las aguas residuales eran un desecho con altos costos de tratamiento. Incluso los subproductos del tratamiento de aguas residuales —incluida el agua residual tratada—, eran clasificados como desechos con ningún valor para el prestador. No obstante, en la contemporaneidad, al considerar que las aguas residuales municipales están compuestas en un 99,8% por agua (López y otros, 2017), y la creciente escasez del recurso en algunas zonas, es plausible reinterpretar el agua residual tratada como un recurso valioso. Este puede destinarse al reciclaje y suministro doméstico o, alternativamente, al riego agrícola y paisajístico, contribuyendo de esta manera a mitigar externalidades negativas asociadas a la escasez o deficiente calidad del agua (Saravia Matus y otros, 2022a; UNEP, 2023).

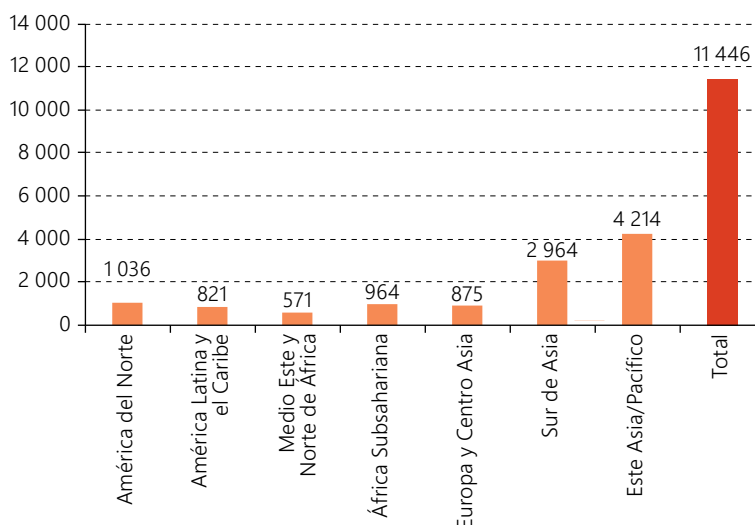
Asimismo, la recuperación de energía y nutrientes en las PTAR, emergen como prácticas de transformación de desechos en recursos, respecto a las cuales se ha probado su viabilidad técnica y económica. A continuación, se realiza un análisis general de las oportunidades que estas dos prácticas representan para el sector y que concentran el enfoque de este estudio.

1. El metano

El metano, un contaminante atmosférico local de gran potencia, contribuye significativamente a la formación de ozono y, después del dióxido de carbono, constituye el gas de efecto invernadero con la mayor incidencia en el cambio climático. Su capacidad para atrapar calor supera en 28 veces la del dióxido de carbono en un período de 100 años, siendo 84 veces más potente en un lapso de 20 años, y ha contribuido aproximadamente al 30% del calentamiento global hasta la fecha (UNEP, 2021; CE, 2023).

En el ámbito del agua y saneamiento, las emisiones de metano se generan principalmente durante el tratamiento anaeróbico de aguas residuales o mediante la digestión anaeróbica de los lodos producidos en el tratamiento aerobio de aguas residuales. A nivel global, las emisiones de metano han crecido más de un 22% desde 1990 (Banco Mundial, 2020) y las PTAR son responsables del 5% de las emisiones de metano (Aguilar y Blanco, 2018). Estas emisiones de CH₄ en las PTAR alcanzaron los 11,4 millones de toneladas en el año 2022 —320 millones de toneladas de CO₂ equivalente—, teniendo ALC una participación del 7,18% de las emisiones globales en ese mismo año (GWI, 2022) (ver gráfico 3) y se espera que al 2030 estas emisiones a nivel mundial alcancen las 21,7 millones de toneladas —609 millones de toneladas de CO₂ equivalente— (Aguilar y Blanco, 2018).

Gráfico 3
Emisiones globales de CH₄, 2022
(En miles de toneladas)



Fuente: GWI (2022).

Según la Iniciativa de Política Climática, citada por el Clean Air Task Force (CATF, 2023), se estima que anualmente se necesitarían alrededor de USD 119.000 millones en los sectores de agricultura, energía y residuos para limitar el aumento global de la temperatura a menos de 2 grados centígrados. A pesar del elevado potencial de contribución al calentamiento global del metano, se le asigna una prioridad inferior en términos de reducción, reflejándose en un financiamiento para mitigación inferior al 2% del Fondo Climático (Banco Mundial, 2023b).

El proceso de digestión anaerobia de las aguas residuales produce gas metano como subproducto, el cual puede ser aprovechado in situ para diversos procesos dentro de la planta de tratamiento, como calentar el digestor de lodos, mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica, y secar y reducir el volumen de los lodos antes de su disposición final (López y otros, 2017). Este biogás también puede ser utilizado para generar energía, reemplazando la compra de energía al sistema público, o incluso, después de su purificación, ser empleado directamente como combustible en vehículos, industrias o residencias.

La producción total de metano por unidad de tiempo (m^3 /día u otro parámetro similar) en una PTAR municipal depende principalmente de la tecnología de tratamiento, así como de los volúmenes de aguas tratadas, la concentración y composición de la materia orgánica presente en el agua residual. Algunos de factores varían según 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 realizadas en la zona de recolección del agua residual (Von Sperling, 2005). La temperatura del proceso y las características y eficiencia de la tecnología también influyen en la producción de metano (López y otros, 2017). Como ejemplo práctico tenemos que una PTAR anaeróbica que recibe 1.000 toneladas de Demanda Química de Oxígeno (DQO) anualmente¹, puede generar cerca de 2.850 MWh/año mediante un sistema anaeróbico de aprovechamiento de metano (Hernández, 2021), a la vez que reduce significativamente la producción de lodos, reduciendo tanto los costos como el impacto ambiental del tratamiento de aguas residuales, todo lo cual coincide con los principios de la economía circular al convertir los residuos en recursos para otros procesos.

La segunda alternativa es recuperar el metano generado mediante la digestión anaerobia de lodos producidos en el tratamiento aerobio de aguas residuales. Esta técnica puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 21% en las plantas de tratamiento de tipo aerobio y contribuir hasta con el 14% de la energía requerida para la planta, generando beneficios ambientales significativos (Aguilar y Blanco, 2018).

Lo anterior cobra mayor relevancia si se considera que a nivel internacional una alta proporción de los costos operativos de las PTAR con tecnología de tipo aerobio —opción de tratamiento que es la más empleada en ALC—, están relacionados con el manejo y disposición final de lodos (un promedio del 50%) y que la adopción de alternativas de digestión anaerobia para el aprovechamiento de metano puede llegar a reducir entre seis a ocho veces los volúmenes de biosólidos a disponer. Sin duda alguna, la recuperación de metano de lodos mediante su digestión anaerobia, se configura en una oportunidad importante a considerar.

En plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala, como la biofactoría Mapocho Trebal en Santiago de Chile, el 83% de la energía consumida es renovable, autogenerada a partir del metano recuperado (Aguas Andinas, s.f.). Asimismo, estudios documentan que la PTAR Zona Noreste en Villa Hermosa, México, podría producir biogás cuyo potencial energético representaría el 128% de la demanda energética de la planta (Ramírez, Medrano, & Escobedo, 2020). En este sentido, la adopción de tecnologías de digestión anaerobia para la recuperación de metano se presenta como una oportunidad relevante.

En ALC, se ha identificado un considerable potencial de generación de energía eléctrica en PTAR con capacidades de tratamiento superiores a los 500 l/s mediante el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento anaerobio de aguas residuales o la digestión anaerobia de lodos derivados de un tratamiento aerobio de aguas residuales. Se estima que la explotación energética del metano en 75 PTAR —que atienden a 33 millones de personas— requeriría inversiones por aproximadamente USD 251 millones, con un retorno proyectado a 20 años de USD 342 millones, logrando así una relación beneficio/costo de 1,36. (Saravia Matus y otros, 2022a; Saravia Matus y otros, 2023b).

Aunque la viabilidad financiera del aprovechamiento energético del metano se ha confirmado en PTAR con capacidades superiores a los 500 l/s (Saravia Matus y otros, 2022a; Saravia Matus y otros, 2023b), y de hecho, es una tecnología ampliamente implementada en las grandes PTAR de la región —por ejemplo, en la PTAR Atotinolco en México, la emisión de metano de la digestión de lodos se emplea para generar el 80 por ciento de la electricidad para el autoconsumo y para calentar los digestores (UNESCO, 2023)—, debe anotarse que se ha prestado escasa atención a las PTAR de menor capacidad, las cuales serán consideradas en este estudio.

Hay que recordar que según UNEP (2021) el 20% de las emisiones de metano asociadas a la actividad humana se originan en el sector de residuos, el cual incluye la disposición final de residuos sólidos y el

¹ Equivalente a las descargas de aguas residuales de aproximadamente 150.000 habitantes durante un año.

tratamiento de aguas residuales. Se estima que, a escala mundial, el reducir las emisiones de metano en un 4,5% evitaría 260.000 muertes prematuras, 775.000 visitas al hospital por asma, 73 mil millones de horas de trabajo perdidas debido al calor extremo y 25 millones de toneladas de pérdidas de cultivos al año (UNEP, 2021). En ese contexto la adopción de un enfoque de economía circular en el tratamiento de las aguas residuales, que reduzca las emisiones de metano representa importantes retornos en términos ambientales, económicos y financieros que contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas de suministro de agua y saneamiento, así como de las empresas que los operan (Rodríguez y otros, 2020). En resumen, la aplicación de los principios de la economía circular en la gestión de aguas residuales, mediante la recuperación y reutilización de recursos, contribuye a transformar el saneamiento de aguas residuales, de un servicio costoso a uno autosostenible, que agrega valor a la economía (Ibid.). Al incorporar estas iniciativas en el sector, no solo se contribuye a la reducción de las emisiones de metano, sino que también se impulsa una estrategia eficaz y rentable para alcanzar el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5 °C, al tiempo que se respaldan los medios de vida de millones de personas.

2. Los nutrientes: un recurso estratégico y un grave problema ambiental

La agricultura moderna está basada en el uso de fertilizantes inorgánicos que aportan tres macronutrientes principales, la tríada N-P-K: nitrógeno (N)², fósforo (P), y potasio (K). A diferencia de los fertilizantes nitrogenados, los fertilizantes que contienen P y K provienen exclusivamente de la minería de rocas fosfóricas y de minerales como cloruro de potasio. Las rocas fosfóricas (fosfatos) son un recurso limitado y se concentran en pocos países. El 75% de las reservas de fosfato de alta calidad a nivel mundial están controladas por Marruecos, situado el Sahara Occidental, una región de alta sensibilidad geopolítica. Cualquier conflicto en esta área podría generar interrupciones en el suministro, provocando un aumento en el precio de esta materia prima.

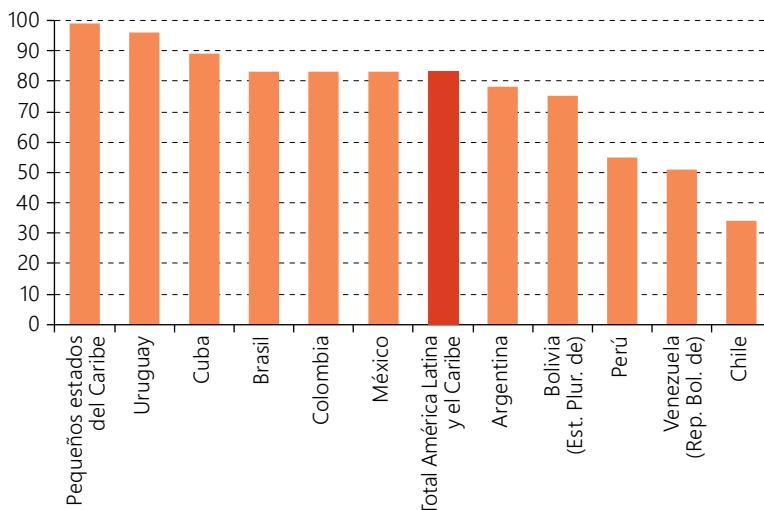
La vulnerabilidad en el suministro global de fertilizantes se evidenció rápidamente después de la invasión de Ucrania por el ejército ruso en 2022. Las sanciones económicas a Rusia, el principal exportador mundial de fertilizantes, generaron una disrupción en el mercado y un aumento significativo de los precios. En 2022, el valor de las importaciones de fertilizantes químicos en ALC aumentó un 137%, a pesar de una reducción del 4% en el volumen de fertilizantes importados (IICA, 2023). Este incremento de precios afectó especialmente a agricultores familiares y pequeños productores, repercutiendo parcialmente en los costos de los alimentos.

A pesar de las excepciones en Brasil, con depósitos de potasio, y en Perú y México, con depósitos significativos de rocas fosfóricas, la mayoría de los países de ALC carecen de reservas significativas de estos minerales, por lo que aproximadamente el 85% de los fertilizantes son importados, destacando la alta dependencia de la región de estos insumos (ver gráfico 4).

Una parte significativa de los nutrientes aplicados a los campos agrícolas a través de fertilizantes es absorbida por los cultivos, que luego sirven como alimento para animales y, finalmente, para los humanos. Esta cadena alimentaria transporta nutrientes como N y P hasta llegar al consumidor humano. Después de la ingestión, buena parte de estos elementos es excretada en las aguas residuales municipales, siendo la orina una fuente especialmente rica, contribuyendo con el 80% de la carga total de N y el 45% de la carga total de P (Wilsenach & Van Loosdrecht, 2004). Las emisiones per cápita de fósforo oscilan entre 1,7 y 2,1 gramos por persona/día (Sánchez y Martins, 2021).

² Los fertilizantes nitrogenados son producidos a partir de gas natural y del nitrógeno del aire, generalmente en plantas químicas de gran tamaño que usan el proceso Haber-Bosch para producir amoníaco y, posteriormente, urea. Actualmente se está desarrollando, como ruta alternativa al gas natural, el uso de hidrógeno "verde" producido mediante la reforma de biogás o mediante la electrólisis del agua con energía eléctrica de fuentes renovables. De esa forma se pretende reducir las emisiones de CO₂ del proceso, y la correspondiente huella de carbono de ese tipo de fertilizante. ALC cuenta con regiones productoras de gas natural y con abundancia de fuentes renovables de energía. Pese a ello, la industria química de ALC no consigue producir fertilizantes nitrogenados en cantidad suficiente para abastecer su mercado interno.

Gráfico 4
Porcentaje de fertilizante importado respecto al consumido en países de América Latina y el Caribe, 2020
(En porcentajes)



Fuente: Banco Mundial (2023c).

Aunque las regulaciones en países desarrollados están presionando para reducir el contenido de P en detergentes y jabones (EU, 2012), las aguas residuales municipales suelen contener entre 25-40 mg/l de N y 4-16 mg/l de P (Tomei y otros, 2020).

Las aguas residuales provenientes de la industria agropecuaria o del procesamiento de productos agrícolas presentan cargas de nutrientes aún mayores, pudiendo duplicar los niveles hasta 95 mg/l de N y 50 mg/l de P (Vidal y otros, 2016; Monballiu y otros, 2020).

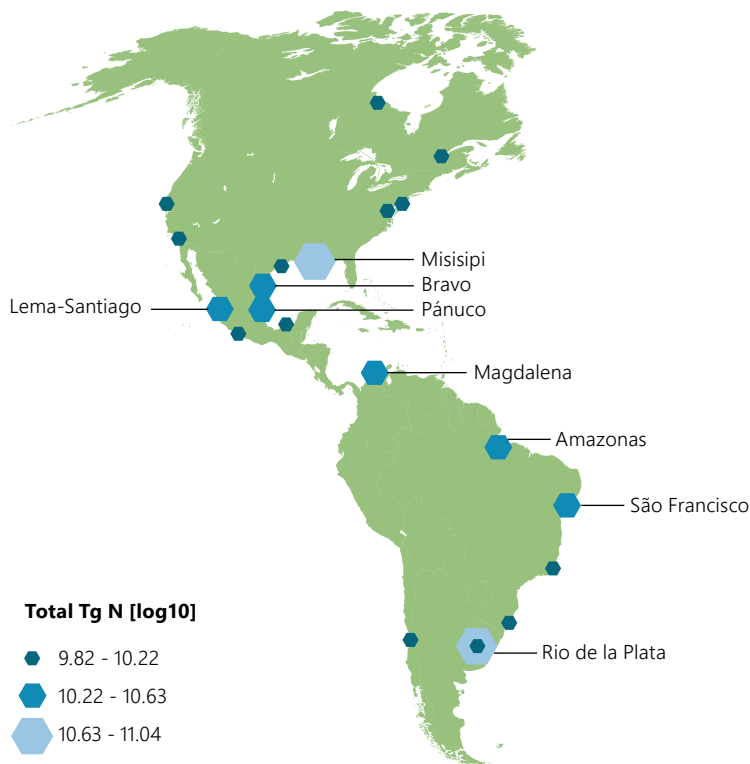
En ALC, solo el 41% de las aguas residuales fueron tratadas en 2021 (División de Estadística de las Naciones Unidas, 2021). La falta de cobertura de redes de saneamiento en áreas urbanas irregulares y en zonas rurales, aunado a la inexistencia de sistemas individuales altamente deficientes y sin control sistemático conlleva a una muy baja posibilidad de lograr niveles de tratamiento de las aguas residuales en estas áreas. Además, la escorrentía de campos de cultivo representa una fuente significativa de contaminación, ya que alrededor del 20% de los nutrientes aplicados a los campos puede perderse por este proceso (Smith y otros, 2016). Estos nutrientes, al llegar a cuerpos de agua, desencadenan la proliferación de cianobacterias y algas, generando episodios de brotes de algas comunes en diversas regiones de América (Dai, y otros, 2023). Este fenómeno, conocido como eutrofización, conlleva a la formación de zonas muertas, afectando gravemente la vida acuática, la biodiversidad, y las comunidades dependientes de la pesca, así como el uso recreativo y turístico de las aguas (CEPAL, 2020).

La eutrofización representa un desafío ambiental de magnitud, con consecuencias adversas para la calidad del agua, la biodiversidad acuática y la capacidad de los cuerpos de agua para brindar servicios ecosistémicos. En el mundo, los niveles de acidificación de los océanos se acercan a niveles peligrosos (CEPAL, 2020) y en ALC ya se registran casos graves de ríos, lagos y zonas costeras afectados por este fenómeno. El exceso de nutrientes, principalmente N y P, se desplaza a través de las cuencas hasta llegar al mar, donde las condiciones de dilución no siempre logran dispersarlos. Según estudios, los océanos reciben anualmente 21,7 millones de toneladas de N, siendo el 71% proveniente de fertilizantes agrícolas y el 29% de vertidos de aguas residuales (Tuholske y otros, 2021).

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas establece la meta de prevenir y reducir la contaminación marina, incluida la derivada de actividades terrestres, para 2025 (Meta 14.1). Para evaluar el progreso, se utiliza el “indicador del potencial de eutrofización costera”, basado en las cargas de N, P y sílice transportadas por ríos hacia aguas costeras. Informes recientes confirman un empeoramiento de este problema en varias regiones costeras de ALC (CEPAL, 2020; Naciones Unidas, 2022).

En el mapa 1 se identifican puntos críticos de descarga de N en la desembocadura de destacados ríos, como el Amazonas, São Francisco, Magdalena, Bravo, Pánuco y Lerma-Santiago, además de los deltas del Misisipi y del Río de la Plata. Para abordar la eutrofización, es imperativo mejorar la eficiencia en la aplicación de fertilizantes mediante prácticas agrícolas avanzadas y el uso de fertilizantes de liberación lenta. Asimismo, se requieren acciones para aumentar la cobertura y tratamiento de aguas residuales, destacando el papel clave de las PTAR de mediana y gran escala. Estas instalaciones, al tratar aguas domésticas o de la agroindustria, pueden reducir significativamente las concentraciones de N y P en su efluente final mediante la instalación de sistemas de recuperación de nutrientes. Este tipo de sistemas “captura” una parte del N y el P que sería vertido en el efluente final de la planta, y recupera estos elementos en la forma de fertilizantes u otros productos de valor añadido.

Mapa 1
Emisiones costeras de Nitrógeno en América



Fuente: Adaptado de Tuholske y otros (2021).

La Unión Europea (UE), al igual que ALC, enfrenta una considerable dependencia de la importación de roca fosfórica, considerándola como una materia prima crítica. Desde 2014, las rocas fosfatadas y, desde 2017, el fósforo, figuran en la lista de materias primas críticas publicada por la UE, que evalúa su relevancia económica y riesgo de desabastecimiento (UE, 2023). En particular, la norma alemana sobre lodos sanitarios obliga a todas las PTAR mayores de 50.000 habitantes —equivalentes a recuperar el P del lodo antes de proceder a su aplicación en suelos agrícolas o en vertederos. En caso contrario, deberán proceder a la valoración energética del lodo (incinerarlo). Poco después de la aprobación de la esa norma,

Austria y Suiza adoptaron normativas similares. Se espera que la próxima norma de la UE sobre lodos sanitarios, que será obligatoria en los 27 países de la UE, también obligue o por los menos promueva la recuperación de P de lodos.

En el mundo existen múltiples casos de PTAR con recuperación de nutrientes. Aquapolo, en São Paulo (Brasil), con producción media de agua reciclada de 350 l/s, es la mayor planta de reúso de agua residual de todo el hemisferio sur. Esta planta usa el efluente de una PTAR municipal y, luego de tratarlo y pulimentar su calidad, lo comercializa como agua reciclada en un polo petroquímico cercano. Las industrias localizadas en el polo usan esa agua reciclada en torres de refrigeración. Aquapolo está obligada, por contrato, a entregar agua reciclada con estándares muy exigentes de calidad. Así, a partir del influente que llega de la PTAR municipal con una concentración media de 20 mg/l de $\text{NH}_4\text{-N}$ (nitrógeno amoniacal) y de 5 mg/l de P, mediante un proceso que combina ultrafiltración y un reactor biológico de membranas, se consigue reducir esos valores para 1 mg/l de $\text{NH}_4\text{-N}$ y 0,5 mg/l de P (Sánchez, 2021).

Uno de los mayores ejemplos de reúso de agua residual tratada para cultivos en ALC está en la PTAR Atotonilco, que trata el 60% de los efluentes de la Zona Metropolitana del Valle de México. Buena parte de esa agua residual tratada es reutilizada en los campos agrícolas de Tula. La norma mexicana de reúso de agua regula los límites máximos permisibles de coliformes fecales, huevos de helminto, grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, y sólidos suspendidos totales en el efluente reutilizado, pero no indica valores de máximos de N y P adicionales a los límites de la norma de descarga (SEMARNAT, 2022).

Otro ejemplo relevante es la PTAR Cachiche-Ica, en Perú, que produce agua de reúso para la agricultura a partir de las aguas residuales de la ciudad de Ica. De entre los parámetros de calidad que son exigidos a esta agua reutilizada, también están los referentes a nutrientes, ya que deben ser respetados unos límites máximos de 10 mg/l de P y de 10 mg/l de NTK (Agrokasa, 2020).

A nivel mundial, el país líder en reúso de agua para la agricultura es Israel, el cual recicla actualmente 90% de sus aguas residuales municipales (Basani, 2023). En la PTAR de Shafdan, que trata las aguas residuales de un área con 2,5 millones de habitantes, el efluente tratado se inyecta en un acuífero, donde es filtrado naturalmente antes de ser bombeado y usado en cultivos en el desierto. Debido a la necesidad de reducir la carga de nutrientes en el efluente y proteger así el acuífero, se inauguró en 2018 una planta de recuperación de nutrientes en forma de estruvita, que produce 2000 toneladas por año de esta sustancia fertilizante (Ostara, 2018).

En síntesis, la instalación de sistemas de recuperación de nutrientes en PTAR reduce las concentraciones de N y de P que serían vertidos en el efluente final de la planta, disminuyendo radicalmente sus efectos sobre el medio ambiente, creando una cadena de valor para insumos claves para la industria agrícola y ayudando a cumplir con las normas de descarga cada vez más restrictivas, o con estándares específicos para reúso industrial, agrícola, o de recarga de acuíferos, que ya se comienzan a establecer en el mundo y la región.

II. Viabilidad económica del aprovechamiento de metano en PTAR con capacidades menores a 500 l/s: casos de estudio en México y El Salvador

Dado que la investigación sobre la viabilidad del aprovechamiento de metano en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) con capacidades superiores a los 500 l/s ya está ampliamente documentada (Nolasco, 2010; Silva y otros, 2016; Saravia Matus y otros, 2022a); y considerando la proliferación generalizada de PTAR con capacidades instaladas inferiores a los 500 l/s en ALC³; este capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad financiera de la recuperación de metano en PTAR con capacidades inferiores a ese umbral, centrándose especialmente en casos específicos de El Salvador y México.

Para llevar a cabo este análisis, se realizará una estimación inicial de las emisiones asociadas a cada proceso de tratamiento en cada PTAR. Se calculará el metano aprovechable y la energía eléctrica generable. Además, se llevará a cabo un examen detallado de la viabilidad financiera, así como de los beneficios ambientales y socioeconómicos que podrían derivarse al aprovechar el metano en la cogeneración de energía en cuatro PTAR de México y tres de El Salvador.

Para la selección de estas siete PTAR, se realizó un análisis conjunto con la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador (ANDA), la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA), la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) la Comisión de Agua Potable del Estado de México (CAEM) y la Comisión de Agua Potable de Quintana Roo (CAPA), siguiendo los criterios de selección que se ilustran a continuación⁴:

- Oportunidad: se priorizaron las PTAR que contaran con la posibilidad de capturar y utilizar el metano producido como fuente de energía, ya sea para la generación eléctrica, calefacción u otras aplicaciones, con el objetivo de maximizar los beneficios económicos y ambientales.

³ En México, por ejemplo, Saravia Matus y otros (2022a) documentaron la existencia de 2.639 PTAR, de las cuales 2.567 cuentan con capacidades instaladas inferiores a 500 l/s.

⁴ Para el caso de México, aunque no se configuró como un requisito para su selección debe anotarse que de las PTAR seleccionadas en México, 3 se encuentran en el Estado de Quintana Roo, una zona estratégica para el país debido a su relevancia en el ámbito turístico a nivel regional y mundial. Además, la cuarta PTAR se sitúa en San Martín de las Pirámides, un municipio del Estado de México con una importancia singular debido a que abarca una parte significativa de la zona arqueológica de Teotihuacán, destacando la imponente Pirámide del Sol.

- **Replicabilidad:** se buscaron proyectos que sean replicables en diferentes regiones de México, El Salvador y otros países de Latinoamérica. Para ello, se seleccionaron PTAR que tuvieran la capacidad de atender a una población de más de 30.000 habitantes (50 l/s) y menos de 200.000 habitantes (300 l/s). Esta diversidad permitirá evaluar la viabilidad de implementación en diversos contextos geográficos, climáticos y demográficos.
- **Interés local:** se dio prioridad a las PTAR cuyos operadores y gobierno local demostraran disposición y compromiso para desarrollar y mantener el proyecto a corto y mediano plazo. La participación de los actores locales resulta fundamental para garantizar el éxito a largo plazo de las instalaciones de aprovechamiento de metano, así como para involucrar a la comunidad y promover la apropiación de la tecnología.

Estas ubicaciones estratégicas permiten promover un enfoque sostenible que integre tanto la protección del medio ambiente como el impulso económico y turístico de la región. La sinergia entre el turismo y el aprovechamiento de metano en estas PTAR permite la creación de oportunidades de promoción internacional de adopción de prácticas sustentables y la generación de empleo local, mientras se protege la salud humana y ambiental.

A. Metodología empleada en la estimación de emisiones de metano en el tratamiento de aguas residuales

Para realizar la estimación de las emisiones de metano en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, se empleó el procedimiento de cálculo propuesto por el IPCC (2006) e IPCC (2019), que depende de la carga orgánica específica que recibe la planta para estimar la cantidad de metano por generada en las PTAR (ver anexos 1, 2 y 3).

Dicha metodología, permite estimar las emisiones de metano en cada una de las etapas del proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales. Estas etapas o fases principales corresponden a: i) etapa de tratamiento secundario de aguas residuales, ya sea anaerobia o aerobia, y ii) fases posteriores de digestión de los lodos generados en el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales. En la fase secundaria, las emisiones de metano en una PTAR dependen de dos factores de manera predominante. En principio, de la tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales, ya que esta determina si la materia orgánica se degrada transformándose en biogás, o en lodos. Y en segunda medida, del adecuado funcionamiento de las instalaciones.

A este respecto, es necesario anotar que las PTAR que emplean tecnologías anaerobias —ya sea a partir de reactores compactos o de sistemas lagunares— realizan un proceso de degradación de la materia orgánica, transformándola mayoritariamente en biogás con alto contenido de metano (Saravia Matus y otros, 2022a; Saravia Matus y otros, 2023b).

Por otro lado, los sistemas que emplean procesos aerobios —cuando se encuentran bien operados— cuentan con niveles muy bajos de generación de metano en su tren de aguas, ya que degradan la materia orgánica, transformándola mayoritariamente en lodos. En estos sistemas, las emisiones de metano se presentan, ya no en el tratamiento de las aguas residuales, sino en el tren de lodos cuando se realiza su digestión anaerobia. Cabe aclarar que, si se realiza una estabilización aerobia de los lodos, no habría emisiones importantes de metano.

En las PTAR que constan de tecnologías duales (anaerobia-aerobia), la estimación de las emisiones potenciales de metano debe realizarse por separado, con base en las corrientes o procesos principales, de acuerdo con las recomendaciones del IPCC (2019). Esto implica que, en la primera corriente de tratamiento (proceso anaerobio), la carga de DQO a considerar en la estimación, corresponde a la carga entrante al

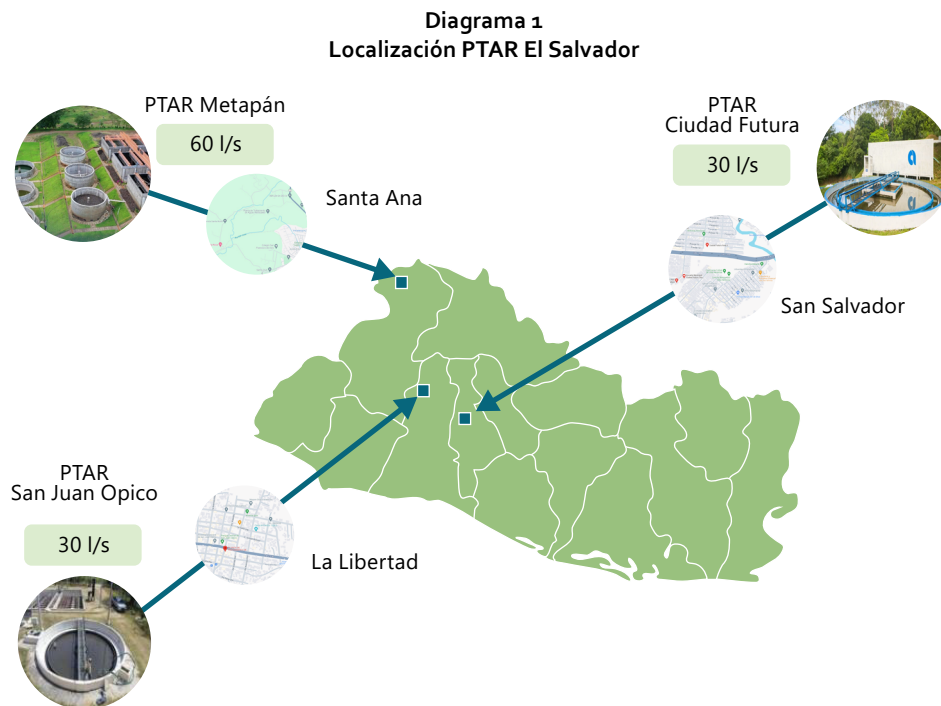
sistema; mientras en la segunda corriente de tratamiento (proceso aerobio), la carga orgánica a considerar en la estimación corresponde a la diferencia entre la carga de entrada a la PTAR y la carga removida en la etapa de tratamiento anaerobio (primera corriente)⁵.

En el caso de los sistemas que emplean tratamiento secundario aerobio y en los cuales se añadiría un proceso de digestión anaerobia de lodos, se debe tener presente que: (i) para el cálculo de emisiones de la primera corriente (tratamiento aerobio), se emplea la carga de entrada al sistema en DBO/año para la estimación; mientras para la segunda corriente (correspondiente a una futura digestión anaerobia de lodos) se estiman las emisiones a partir de la cantidad de lodo generado en el proceso de tratamiento biológico previo (primera corriente).

B. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de El Salvador

1. Caracterización general de las PTAR

Las PTAR a ser analizadas corresponden a las plantas de Ciudad Futura (municipio de Cuscatancingo, Departamento de San Salvador), San Juan Opico (municipio de San Juan Opico, Departamento de La Libertad) y Metapán (municipio de Metapán, Departamento de Santa Ana).



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por ANDA y ASA.

⁵ Se debe aclarar que para este caso, no sería procedente el cálculo adicional de emisiones por efecto de la recirculación de los lodos generados en la fase aerobia, en el reactor UASB por las siguientes razones:

- La mayor proporción de lodos aerobios generados en el proceso previo de LAC son recirculados dentro del mismo proceso, pasando del clarificador o sedimentador secundario al reactor biológico de LAC, como se aprecia en el diagrama de la PTAR de San Martín de las Pirámides, práctica corriente y necesaria dentro del proceso aerobio para mantener, con ayuda de la aireación, un lodo activo que potencie la eficiencia de remoción de carga orgánica.
- El exceso de lodo del reactor LAC asociado con procesos de purga podría ser recirculado al reactor UASB, pero este material es en esencia un lodo aerobio que puede afectar la actividad metanogénica de lodo presente en el reactor anaerobio.

La PTAR “San Juan Opico”, es una planta operada por la ANDA, y se encuentra ubicada en el sector Las Playitas del municipio San Juan Opico (departamento La Libertad); cuenta con una capacidad instalada de 30 l/s; un caudal tratado de 25,34 l/s; y sirve un estimado de 10.040 habitantes (ANDA, 2022).

Por otro lado, la PTAR “Ciudad Futura”, también operada por la ANDA, se encuentra ubicada en el municipio de Cuscatancingo, departamento de San Salvador; cuenta con una capacidad instalada de 30 l/s; un caudal tratado de 26,04 l/s; y sirve un estimado de 21.250 habitantes.

Finalmente, la PTAR de Metapán, operada por la municipalidad, destaca por ser la más grande en capacidad y de construcción reciente (del grupo de PTAR analizadas). Con una capacidad instalada de 60 l/s y un caudal medio tratado de 50 l/s, brinda servicios a cerca de 19.830 habitantes (véase cuadro 1).

Cuadro 1
Características generales de las PTAR de estudio en El Salvador

Nombre	Tecnología de Tratamiento	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Habitantes atendidos	Concentración del afluente ^a		
					DQO (Mg/l)	DBO (Mg/l)	SST (Mg/l)
San Juan Opico (Dpto. La Libertad)	Anaerobio (RAFA) + aerobio (FP)	30	25,34	10 040	496,0	198,0	265,0
Ciudad Futura (Dpto. San Salvador)	Anaerobio (RAFA) + aerobio (FP)	30	26,04	21 250	780,0	375,0	1 411,0
Metapán (Dpto. San Ana)	Anaerobio (RAFA) + Aerobio (FP)	60	50,00	19 830	700,0	312,5	530,0

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la ANDA y validada en taller CEPAL celebrado en septiembre de 2023 en San Salvador.

^a Información reportada por ANDA y ASA en taller de capacitación CEPAL del 5 de septiembre de 2023 en San Salvador.

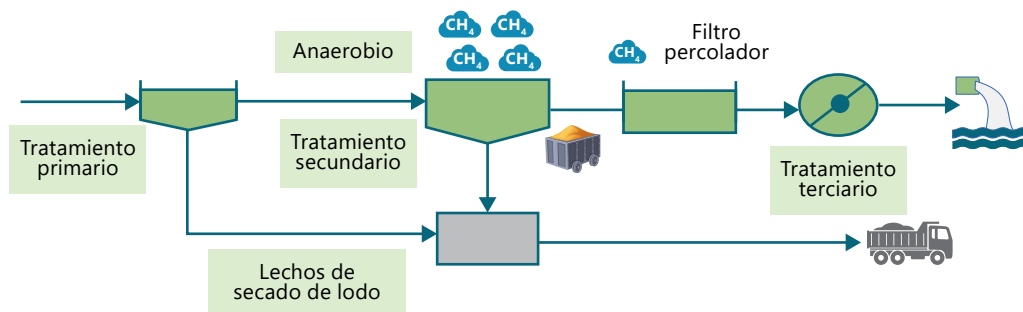
En estas tres PTAR, la tecnología empleada en el tratamiento secundario de las aguas residuales está centrada en Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)⁶, el cual se complementa con un proceso aerobio de Filtro Percolador (FP). El proceso consta de tres etapas: una etapa de tratamiento preliminar o primario, que consta de rejillas y desarenador (ambos para la retención de sólidos), y medidor de caudales; una etapa de tratamiento secundario, que consiste en el paso de las aguas residuales por el reactor RAFA, en donde la materia orgánica que contiene las aguas residuales, es degradada (y se genera metano); y una segunda etapa de tratamiento secundario, en el que las aguas residuales provenientes del reactor RAFA son bombeadas⁷ hacia el FP, donde son tratadas en un entorno aerobio (ANDA, 2022). Posteriormente, en la tercera fase, el agua tratada pasa por un decantador, en donde se separan los lodos que se formaron durante el paso de las aguas residuales por el filtro biológico, que posteriormente son purgados y dispuestos en un patio de secado; mientras las aguas tratadas son conducidas a disposición final (ANDA, 2022).

Entre los problemas que se ha identificado con respecto a las dos primeras PTAR (San Juan Opico y Ciudad Futura), se ha destacado que “tienen baja eficiencia y hay parámetros que no cumplen por deficiencias en el diseño y en la construcción (...) los más relevantes son: problemas electromecánicos por cortes de energía, deterioro o daños en los equipos de bombeo y distribución no uniforme de caudales en el filtro biológico o percolador” (ANDA, 2022). El diagrama 2, muestra el esquema general de tratamiento de la PTAR San Juan Opico, al cual es similar al proceso de tratamiento que se tiene en la PTAR Ciudad Futura. En el caso de la PTAR Metapán se registra la existencia de tres antorchas para quema de biogás en la fase o tren de aguas del proceso anaerobio de tratamiento.

⁶ También denominados reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

⁷ La PTAR Ciudad de San Juan Opico cuenta con tres sistemas de bombeo. Uno de ellos opera a partir de dos motores de 2hp (caballos de fuerza) cada uno, para bombear las aguas del reactor RAFA al filtro biológico. Los otros dos sistemas emplean cada uno, un motor de 0,5 hp para el bombeo de lodos desde el reactor RAFA y desde el sedimentador secundario, hasta el patio de secado de lodos.

Diagrama 2
Procesos de tratamiento y manejo de lodos en PTAR de estudio de El Salvador



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por ANDA y ASA en septiembre de 2023.

2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica

Según los reportes de los exámenes realizados por la ANDA e información validada en el taller CEPAL celebrado con el ASA y ANDA en septiembre de 2023⁸, las PTAR analizadas presentaron una concentración promedio de entre 496 y 780 miligramos de DQO por litro de agua residual. En cuanto a la carga orgánica, las plantas evaluadas reciben aproximadamente 2.141 toneladas al año en términos de DQO (396 toneladas en San Juan Opico, 641 toneladas en Ciudad Futura y 1.104 toneladas en Metapán). Además, se estima que estas plantas producen alrededor de 603.227 m³ de metano al año, de las cuales el 51,7% corresponden a la planta de Metapán, lo que equivale a cerca de 8.487 toneladas de CO₂ emitidas al año⁹ (ver cuadro 2).

Cuadro 2
Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas de El Salvador

Nombre	Metano generado (M ³ /año)			Metano captado (M ³ /año)		
	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Total	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Total
San Juan Opico	110 982	486	111 468	99 884	0	99 884
Ciudad Futura	179 350	563	179 898	161 415	0	161 415
Metapán	309 053	2 794	311 847	278 148	0	278 148
Total	599 384	3 842	603 227	539 446	0	539 446

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la ANDA.

Como se mencionó en el apartado metodológico, no todo el metano generado en el proceso es aprovechable. Por ejemplo, en estas PTAR de tecnologías duales, aunque se generan pequeñas emisiones en la fase de tratamiento aerobia; no es posible captar dicho metano. De la misma forma, debido a la existencia de ineficiencias en los sistemas de ruteo y captura del metano, solo es posible aprovechar hasta un 90% del metano generado en la fase anaerobia del tratamiento de aguas residuales (ver cuadro 3).

⁸ Las estimaciones de generación de metano y las inversiones asociadas con su potencial aprovechamiento que presenta este documento, fueron preparadas y validadas en el marco de Taller de Capacitación y vista técnica, llevado a cabo en San Salvador durante la primera semana de septiembre de 2023, realizado por CEPAL en coordinación con la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) y del ANDA.

Este taller contó con la participación de profesionales de las entidades descritas, incluyendo personal técnico con responsabilidad sobre cada una de las PTAR analizadas, lo cual permitió retroalimentar y validar de la mejor manera los cálculos y estimaciones efectuados, generando además un valioso intercambio de información sobre proyectos y actividades bajo responsabilidad del ANDA y del ASA.

Para acceder a más detalles sobre el taller, ver: <https://www.cepal.org/es/eventos/cepal-economia-circular-sector-agua-potable-saneamiento-salvador>.

⁹ Si se realiza un comparativo, equivale a las emisiones de CO₂ de 2,5 millones de salvadoreños en un día.

Cuadro 3
Potencial energético de las PTAR analizadas en El Salvador

Nombre	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Habitantes atendidos	Metano		Contenido energético (MWh/año)	Cogeneración de energía	
				Generado (M ³ /año)	Recuperable (M ³ /año)		Eléctrica (MWh/año)	Calórica (MWh/año)
Ciudad de San Juan Opico	30	25,34	10 040	111 468	99 884	996	349	398
Ciudad Futura	30	26,04	21 250	179 912	161 415	1 609	563	644
Metapán	60	50,00	19 830	311 847	278 148	2 773	971	1 109
Total	75	97,38	51 520	603 227	539 446	5 378	1 882	2 151

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la ANDA y ASA y validada como resultado de taller CEPAL en San Salvador de septiembre de 2023.

En ese marco, solo se podrá captar un total de 539.446 m³ de metano, con un contenido energético de 5.375 MWh/año. No obstante, tomando en cuenta las eficiencias de los sistemas de cogeneración, solo serían aprovechables 1.841 MWh de energía eléctrica y 2.151 MWh de energía calórica, al año.

Para ejemplificar este potencial, es necesario considerar el caso específico de Ciudad Futura. Allí, el consumo energético de las estaciones de bombeo de agua potable —según ANDA— es de aproximadamente 1.164 MWh al año. Es decir, la generación de energía eléctrica que se deriva del aprovechamiento de metano en esa PTAR permitiría solventar el 48% de la energía requerida para el abastecimiento de agua potable de esa localidad.

3. Estimación de los costos de inversión

Con el objeto de calcular los beneficios que le reportaría a la ANDA, el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales es necesario definir los costos de inversión en los que se debe incurrir, para captar el metano generable en estas PTAR y transformarlo en energía (ver cuadro 4).

Cuadro 4
Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en El Salvador
(En dólares corrientes)

Concepto	San Juan Opico	Ciudad Futura	Metapán ^a	Total
Soplador centrífugo	N/A	N/A	N/A	N/A
Tubería de biogás ^b	7 500	7 500	1 500	22 500
Antorcha ("flare") (U\$S)	28 400	28 400	N/A	85 200
Gasómetro de biogás	68 100	68 100	68 100	204 300
Desulfurizador	17 400	17 400	17 400	52 200
Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	41 700	41 700	41 700	125 100
Motogenerador a biogás (CHP)	121 121	190 472	266 764	578 357
Cubierta de PEAD Reactor Anaerobio		7 200		7 200
Total	284 221	360 772	395 464	1 040 457

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la ANDA y ASA.

^a La información de inversiones fue validada por ASA. La PTAR de Metapán cuenta con tres antorchas para quema de biogás.

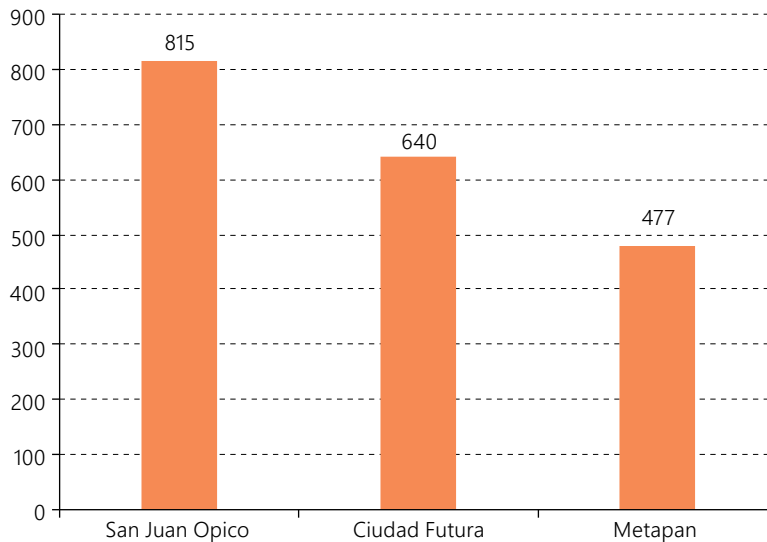
^b Se asume tirada máxima de 50 m.

La intervención consiste en la instalación de un sistema de ruteo, almacenamiento y purificación del biogás (filas 1 a 6 del cuadro 4), así como de moto-generadores de energía, y de un circuito de aprovechamiento de agua caliente (aprovechamiento de energía calórica). Finalmente, si la PTAR generara excedentes de energía, debería considerarse la instalación de una estación de transformación eléctrica, para conectarse a la red y comercializar estos excedentes¹⁰.

¹⁰ En este ejercicio, no se desarrollan estimaciones del costo de inversión asociado a la instalación de un circuito de aprovechamiento de agua caliente (aprovechamiento de energía calórica); y de una estación de transformación eléctrica, para conectarse a la red y comercializar estos excedentes.

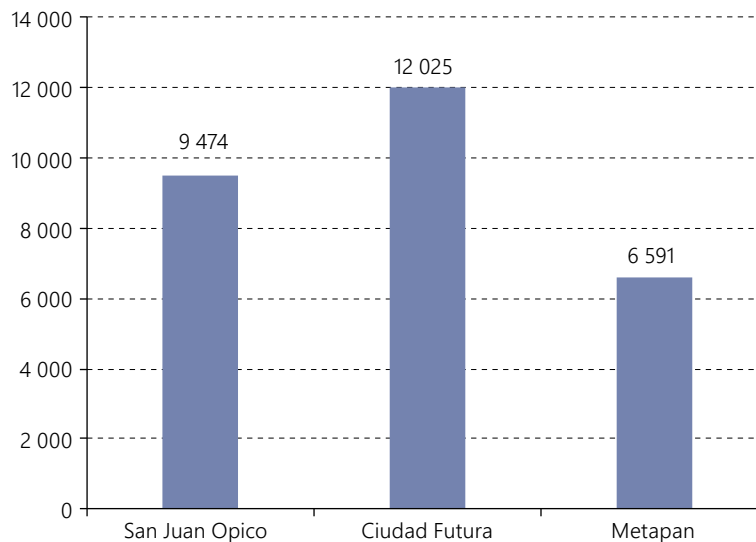
Estas inversiones son relativamente similares para las tres PTAR analizadas, debido a que se trata de sistemas que emplean la misma tecnología de tratamiento con la diferencia de que en el caso de Metapán se presenta una mayor carga orgánica (51,7% del total que ingresa a todas las plantas) por efecto combinado de un mayor caudal y concentración de DQO, lo que demanda la instalación de un motogenerador de mayor potencia eléctrica, que es evidentemente más costoso (ver gráfico 5 y gráfico 6).

Gráfico 5
Costo de inversión por cada MWh/año de energía eléctrica generable en PTAR de El Salvador
(En dólares corrientes/MWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por ANDA.

Gráfico 6
Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de las PTAR de El Salvador
(En dólares corrientes por cada litro/segundo de capacidad instalada)



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por ANDA.

En resumen, se requiere realizar una inversión cercana a los USD 1,04 millones, lo que representa una inversión promedio de USD 20,4 por persona atendida en las tres PTAR, y de USD 193,5 por cada MWh de energía eléctrica generable al año por estas PTAR. Es importante destacar que las diferencias en términos de población atendida y carga orgánica en las aguas residuales influyen en el costo de inversión por persona atendida.

4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano

Para la evaluación financiera del proyecto, se parte de un sencillo supuesto: la energía generada en la PTAR será empleada en la operación de esta PTAR, sustituyendo la energía proveniente de fuentes externas.

Esta sustitución de energía le generará ahorros en la operación de las PTAR, en la medida en que ya no tendrá que destinar cuantiosos recursos para el pago de energía eléctrica. En específico, se evitará un costo de USD 0,17 /KWh, que se deriva de la tarifa de energía para el sector industrial en El Salvador, según la información validada por expertos de ANDA y ASA, lo cual significaría ahorros anuales superiores a USD 300 mil (ver cuadro 5).

Cuadro 5
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de El Salvador
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (L/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial (P.E)	Ahorro anual	VAN Ahorros (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
San Juan Opico	25,34	10 040	284 121	28,3	59 253	504 451	20	1,77	6 90
Ciudad Futura	26,04	21 250	360 772	17,0	95 754	815 204	26	2,26	4,97
Metapán	50,00	19 830	395 464	19,9	145 228	1 236 408	37	3,13	3,44
Total	62,54	51 120	1 040 457	20,4	300 234	2 556 063	29	2,46	4,57

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por ANDA y ASA.

Si se realiza una evaluación financiera, utilizando una tasa de descuento del 10% y un horizonte de 20 años, se podrá identificar que estas inversiones reportan un ingreso estimado de USD 2,5 millones, representando un beneficio cercano a 2,5 veces lo invertido y una tasa interna de retorno del 29%. Específicamente, se identifica que el aprovechamiento de metano y la generación de energía eléctrica en la PTAR Metapán presentaría un retorno de 3,1 veces lo invertido y una tasa interna de retorno del 37% que permitiría recuperar la inversión en 3,4 años. En la PTAR Ciudad de San Juan Opico, la recuperación de la inversión se alcanzaría cerca del séptimo año; mientras que en Ciudad Futura la recuperación de la inversión se presentaría lograría el año 5, con una TIR del 26%.

5. Beneficios ambientales y sociales del aprovechamiento del metano

Además de la evaluación de la viabilidad económica del aprovechamiento de metano en las 3 PTAR evaluadas en El Salvador, uno de los objetivos de este documento, corresponde a la evaluación de los impactos ambientales y sociales del aprovechamiento de metano. A continuación, se realiza una estimación de la reducción de emisiones asociadas a la implementación de cada uno de los proyectos. De la misma forma, se realiza una aproximación a los impactos que de las inversiones en estas PTAR se desprenden, haciendo énfasis en la generación de empleo, y de Valor Agregado Bruto. Esta estimación, realizada a partir de las Matrices Insumo Producto (MIP) del año 2011 desarrolladas por la División Económica de Comercio Internacional e Integración de la CEPAL.

a) Reducción de emisiones

El tratamiento de las aguas residuales es una medida eficaz para mitigar la contaminación causada por la descarga de aguas servidas en fuentes no contaminadas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el propio proceso de tratamiento contribuye a la emisión de GEI. Esto ocurre tanto por la generación de metano debido a la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias, como por la contaminación indirecta que resulta del consumo energético necesario para el funcionamiento de los reactores aerobios (Noyola, Morgan-Sagastume y Güereca, 2013).

Por lo tanto, aprovechar el metano generado en las PTAR tiene múltiples beneficios, entre ellos la reducción de las emisiones de GEI, gracias a la disminución de las emisiones de metano, y la sustitución de las energías provenientes de fuentes convencionales por energías renovables, como el biogás, que se obtiene de fuentes no convencionales (Nolasco, 2010).

Para estimar el impacto ambiental de los proyectos propuestos en este documento, se utiliza, para las tres PTAR, un parámetro de consumo de energía eléctrica de 32 KWh/hab/año (Nolasco, 2010) y el factor de emisión del sistema eléctrico nacional de 0,68 tCO₂e/MWh en el año 2022.

También debe considerarse que actualmente, las tres PTAR generan emisiones de biogás en la fase de tratamiento anaerobio. La PTAR Metapán quema el metano generado, pero las PTAR Ciudad Futura y San Juan Opico liberan el metano a la atmósfera.

En cuanto a la estimación de emisiones en el escenario que contempla la implementación del proyecto, se consideran dos efectos. El primero implica la reducción de emisiones producto de la captación y aprovechamiento de los volúmenes de metano que antes eran emitidos, a través de tea en la PTAR de Metapán y de manera libre en las plantas de San Juan de Opico y Ciudad Futura. El segundo efecto corresponde a la reducción de la demanda de energía eléctrica debido a la generación interna a partir del aprovechamiento del metano.

Los resultados presentados en el cuadro 6 indican que la implementación de los proyectos podría potencialmente reducir las emisiones en aproximadamente 4.810 toneladas de CO₂ equivalente por año. Es importante destacar que estos resultados están limitados por la disponibilidad de información. Es probable que, al considerar los beneficios del aprovechamiento de la energía calórica, así como los factores de emisión adicionales asociados, por ejemplo, al transporte y disposición final de los grandes volúmenes de lodos derivados de la digestión aerobia de lodos en las PTAR estudiados; la reducción estimada de emisiones sea mayor.

Cuadro 6
Reducción de emisiones en las PTAR de estudio de El Salvador
(En toneladas de CO₂ equivalentes al año)

Nombre	Escenario Base (1)			Escenario de proyecto (2)			Reducción emisiones (2-1)
	Consumo Energético	Emisiones Metano	Emisiones totales	Consumo Energía generada	Emisiones Metano	Emisiones totales	
Ciudad de San Juan Opico	218	1 568	1 787	0	163	163	-1 623,8
Ciudad Futura	462	2 531	2 994	79	260	340	-2 654,1
Metapán	432	575	1 006	0	474	474	-531,9
Total	1 112	8 457	5 787	79	897	977	-4 809,9

Fuente: Elaboración propia.

b) Impacto socioeconómico

Para estimar el impacto de las inversiones en las tres PTAR salvadoreñas abordadas en este estudio, sobre la generación de empleos verdes y sobre el valor agregado bruto, se utilizó el simulador desarrollado por Saravia Matus y otros (2022a) y Saravia Matus y otros (2023a)¹¹, a partir de las MIP del 2011 desarrolladas por la División de Comercio Internacional e Integración de la CEPAL. Este simulador permite estimar los impactos de la inversión en saneamiento y captura el efecto contagio con el resto de las industrias que conforman la economía mexicana, lo que permite estimar los efectos directos e indirectos en el empleo y el valor agregado, derivados de las inversiones en agua y saneamiento (ver cuadro 7 y cuadro 8).

Cuadro 7
Impacto de las inversiones sobre el valor agregado bruto en El Salvador

Concepto	En porcentajes	En Millones de dólares
Valor agregado	0,00428	0,98
Efecto directo	0,00313	0,71
Efecto indirecto	0,00115	0,26

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus y otros (2023a).

Cuadro 8
Impacto de las inversiones sobre el empleo en El Salvador

Concepto	En porcentajes	Número de empleos
Nuevos empleos	0,0050	125
Directos	0,0042	105
Indirectos	0,0008	20

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus y otros (2023a).

Los resultados ilustrados evidencian que la ejecución de inversiones por USD 1,04 millones en el aprovechamiento del metano para la generación de energía eléctrica en estas tres PTAR, generaría un incremento del valor agregado en USD 0,98 millones. También pone de manifiesto que la realización de las inversiones propuestas configuraría la creación de 125 nuevos empleos verdes, de los cuales 105 corresponden a empleos directos, y 20 corresponden a empleos indirectos¹².

C. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de México

1. Caracterización general de las PTAR

El cuadro 9 ofrece una visión general de las características de las plantas de tratamiento de aguas residuales evaluadas: tres de estas PTAR están ubicadas en el Estado de Quintana Roo y operan bajo sistemas de tratamiento aerobio, mientras que una de ellas se ubica en el Estado de México y contempla procesos de tratamiento anaerobio (ver diagrama 3). Juntas, estas plantas tienen una capacidad instalada de 590 l/s y tratan aproximadamente 304,9 l/s, brindando servicio a aproximadamente 78.459 habitantes.

¹¹ Se pueden observar los detalles metodológicos en Saravia Matus, y otros (2023a).

¹² Es decir, se genera aproximadamente un empleo por cada USD 8.000 invertidos. En Colombia, según (Mejía & Delgado, 2020) \$1 billón de pesos de inversión en infraestructura genera 28.000 empleos en la economía. Esto es aproximadamente 1 empleo por cada USD 9.600 invertidos.

Diagrama 3
Localización PTAR México



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA, CONAGUA y CAEM.

Con información actualizada del caudal tratado por las PTAR en 2023 —presentada por autoridades y técnicos a cargo de la operación de estas plantas en el marco del Taller CEPAL-CONAGUA 2023— se encontró que, en promedio, estas PTAR operan al 63% de su capacidad. Se destaca la baja utilización de la capacidad instalada en la planta de Bicentenario, que solo emplea el 50% de su capacidad, mientras que la planta de San Miguelito este porcentaje corresponde al 73% (ver cuadro 9).

Cuadro 9
Características generales de las PTAR de estudio en México

Ubicación	Nombre	Tecnología de tratamiento ^a	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado ^b (L/s)	Habitantes atendidos ^b	Concentración de parámetros de control en agua ^p		
						DBO (Mg/l)	DQO (Mg/l)	SST (Mg/l)
Teotihuacan (Edo. México)	San Martín de las Pirámides	Anaerobia/ aerobia (RAFA + LAC)	70,0	45,0	30 240	251	609	245
Othon P. Blanco (Edo. Quintana Roo)	Centenario	Aerobia (LAC)	180,0	120,0	29 623	259	539	
Solidaridad (Edo. Quintana Roo)	Bicentenario	Aerobia (LAC + FP)	120,0	60,0	14 811	454	944	
Cozumel (Edo. Quintana Roo)	San Miguelito	Aerobia (LAC + FP)	220,0	160,0	39 497	400	832	

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA, CONAGUA y CAEM.

^a RAFA + LAC: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente + Lodos Activados Convencionales; LAC: Lodos Activados Convencionales; LAC + FP: Lodos Activados Convencionales + Filtro Percolador.

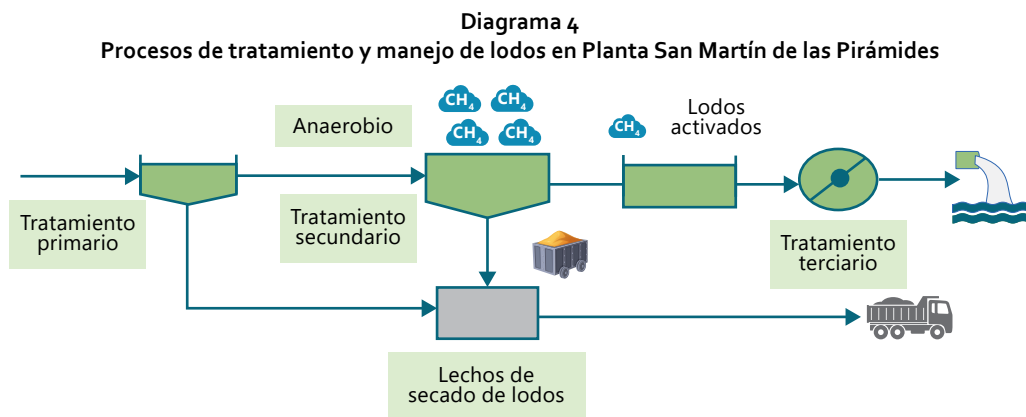
^b Información de caudal, habitantes atendidos y concentración validada en taller de capacitación CEPAL celebrado en julio de 2023 en Quintana Roo y que contó con personal técnico de cada una de las PTAR contenidas en el cuadro.

Para efectos de los cálculos de emisiones de metano, los valores de concentración de carga orgánica (DQO y DBO, según aplique) fueron actualizados en el desarrollo del Taller CEPAL–CONAGUA 2023, con participación de operadores de estas PTAR¹³. A continuación, se ofrece una descripción general de cada una de las PTAR. Este análisis permitirá evaluar su estado actual de operación, determinar la cantidad de metano que podría ser aprovechada en cada una y definir las necesidades de inversión para su aprovechamiento energético.

a) PTAR San Martín de las Pirámides

La PTAR San Martín de las Pirámides es una planta construida en el año 2015, a partir de una inversión de M\$ 44.419.220 (equivalente a USD 2.380.451) con recursos del orden federal (60%) y estatal (40%), que inició operaciones en el 2016. Es operada por la CAEM en coordinación con el Organismo Público Descentralizado de Agua Potable, Alcantarillado, y saneamiento de Teotihuacan (ODEAPAST), y se encuentra ubicada en el municipio de Teotihuacan, Estado de México. Actualmente cuenta con una capacidad instalada de 70 l/s; un caudal tratado de 45 l/s; y una concentración promedio de DQO de 580 miligramos por litro de agua residual que ingresa al sistema, equivalente a una carga cercana a las 823 toneladas de DQO por año.

La tecnología empleada es de tipo dual (anaerobia/aerobia) a partir de un sistema RAFA + LAC que consta de cinco etapas. Una etapa de tratamiento preliminar o primario, que tiene rejillas y desarenador con cárcamo de bombeo (ambos para la retención de sólidos); una segunda etapa de tratamiento secundario, que consiste en el paso de las aguas residuales por el reactor RAFA (acorde con información suministrada por CONAGUA en el Taller CEPAL-CONAGUA 2023, el biogás generado es quemado en una antorcha o tea); y una tercera etapa de tratamiento secundario en el que las aguas residuales provenientes del reactor RAFA son bombeadas hacia el reactor biológico LAC, donde son tratadas en un entorno aerobio. Posteriormente, pasan por un sedimentador secundario en donde se separan los lodos que se formaron en el reactor biológico LAC, y finalmente pasan por un tanque de desinfección para ser conducidas posteriormente al efluente de la planta. Los lodos primarios y secundarios son conducidos a un lecho de secado, en donde se deshidratan antes de su disposición final, teniendo en cuenta que parte de los lodos del sedimentador secundario son recirculados al reactor de lodos activados (véase diagrama 4).



Fuente: Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos. (Sf)

¹³ Las estimaciones de generación de metano y las inversiones asociadas con su potencial aprovechamiento, que se presentan en este documento, fueron preparadas inicialmente por el equipo de proyecto de CEPAL y posteriormente validadas en el taller de capacitación y visita técnica llevado a cabo en Quintana Roo del 18 al 20 de julio de 2023, realizado por CEPAL en coordinación con CONAGUA (Sede Nacional y Dirección Local Estado de Quintana Roo), la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) y la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA).

Este taller contó con la participación de profesionales de las entidades mencionadas, incluyendo personal técnico con responsabilidad sobre cada una de las PTAR analizadas, lo cual permitió retroalimentar y validar de la mejor manera los cálculos y estimaciones efectuados, generando además un valioso intercambio de información sobre proyectos de los Estados de México y de Quintana Roo. Para acceder a más detalles sobre el taller, ver: <https://www.cepal.org/es/eventos/cepal-economia-circular-sector-agua-potable-saneamiento-mexico>.

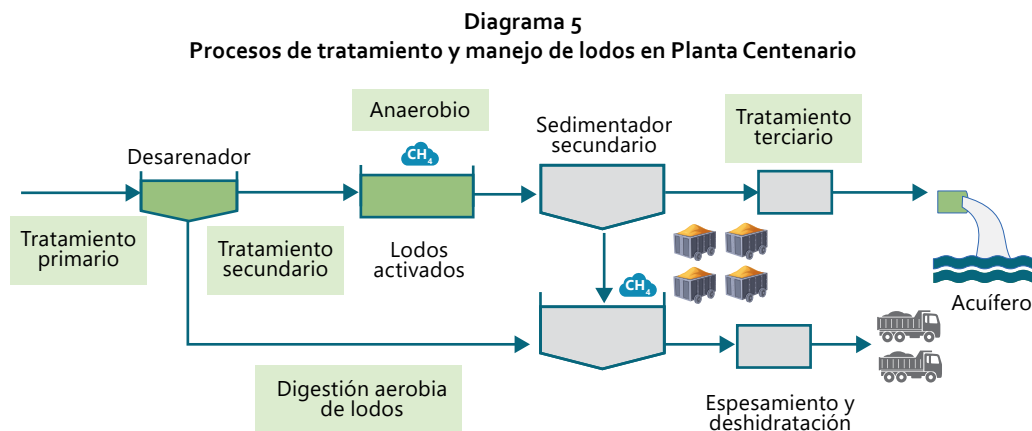
Según la información recopilada por Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos (s.f.)¹⁴, el sistema presentaba en 2022 un consumo energético estimado en 844.165 KWh/año, que acapara el 62% de los costos anuales de operación en esta PTAR, que ascienden en total a M\$3.324.700 (equivalentes alrededor de USD 170.000). El mayor consumo se presenta en los equipos de aireación (sopladores). Según información entregada por CAEM en el Taller CEPAL-CONAGUA 2023, el costo de suministro de energía asciende a USD 0,19 /KWh.

De la misma forma, este mismo equipo consultor, emitió un diagnóstico sobre el estado estructural y de los equipos electromecánicos de la PTAR, concluyendo que se requiere de la reparación del sistema de automatización en las bombas de influente; un mantenimiento general para los sopladores y su instrumentación; el desazolve al cárcamo y purga a los reactores aerobios; y la dictaminación del estado estructural del reactor anaerobio; lo que requeriría una inversión para rehabilitación y puesta en marcha de M\$1.800.000 (entre USD 88.000 y USD 95.000) (Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos, s.f.).

b) PTAR Centenario

La PTAR Centenario es una planta operada por la CAPA, que entró en operación en mayo de 1999 en la localidad de Chetumal, municipio de Othón P. Blanco, Estado Quintana Roo (IPN, 2013). Esta planta inició su operación con una capacidad instalada de 120 l/s, la cual, en la actualidad es de 180 l/s, tratando un caudal promedio de 120 l/s, con concentración media de DBO de 259 miligramos por litro de agua residual que ingresa al sistema, equivalente a cerca de 980 toneladas de DBO por año.

La PTAR emplea un tratamiento secundario aerobio de lodos activados convencionales (LAC) partir de cuatro etapas. Una etapa de tratamiento preliminar o primario para la retención de lodos; una etapa de tratamiento secundario en el que las aguas residuales pasan hacia el reactor biológico LAC. Posteriormente, pasan por un sedimentador secundario en donde se separan los lodos que se formaron en el reactor biológico, y finalmente pasan por un tanque de desinfección (sistema de cloro-gas) para ser conducidas posteriormente al efluente de la planta (pozo con inyección a manglares localizados en costado noreste de la PTAR). Los lodos primarios y secundarios son estabilizados aeróbicamente y deshidratados con filtro de banda (IPN, 2013) (véase diagrama 5).



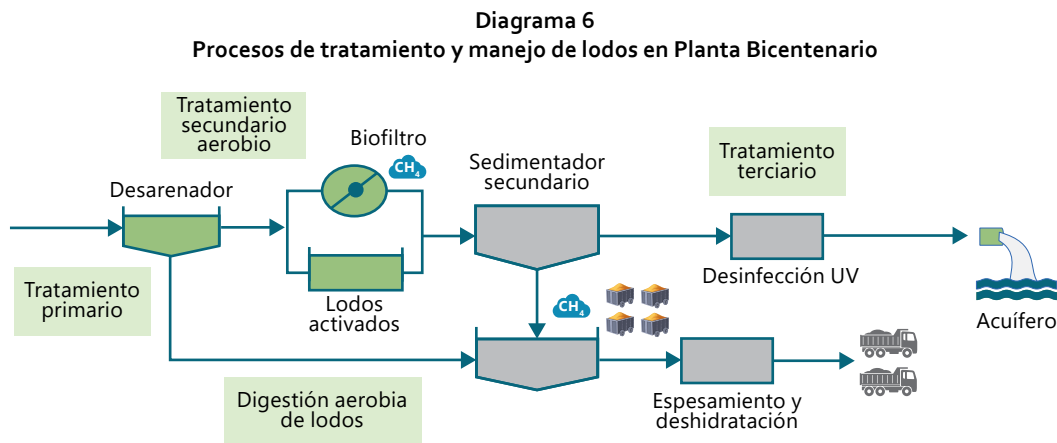
Fuente: Informe 2013—SEMARNAT—CONAGUA.

¹⁴ En el marco del "Diagnóstico de plantas de tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras municipales para 125 municipios".

c) PTAR Bicentenario

La planta Bicentenario, también operada por CAPA, es una PTAR que entró en operación en el 2011 en la localidad de Tulum, municipio Solidaridad, Estado Quintana Roo (IPN, 2013). En la actualidad cuenta con una capacidad instalada de 120 l/s y se adelantan obras de ampliación y adecuación para ampliar capacidad de tratamiento y complementar procesos biológicos para alcanzar una mayor remoción de nutrientes (nitrógeno). El caudal tratado es en promedio de 60 l/s; y se reporta una concentración promedio de 454 miligramos de DBO por litro de agua residual que ingresa al sistema, equivalente a cerca de 859 toneladas por año.

La PTAR emplea un tratamiento secundario aerobio dual, a partir de filtro percolador y un reactor de LAC. El proceso es el siguiente: las aguas residuales llegan al sistema de pretratamiento o tratamiento primario conformado por rejillas finas y desarenador longitudinal; posteriormente son bombeadas al sistema dual conformado por el filtro percolador y el reactor biológico LAC, donde se degrada la materia contenida en las aguas residuales; a continuación se envía a un sedimentador secundario en donde se clarifica el agua que finalmente pasa por un tanque de desinfección (de luz ultravioleta, o a partir de aplicación de cloro líquido o en gas), para ser descargada en un pozo de infiltración (IPN, 2013). Los lodos primarios y secundarios son estabilizados aeróbicamente y deshidratados con filtro de banda (Ibíd). (Véase diagrama 6).



Fuente: Informe 2013-SEMARNAT-CONAGUA.

Uno de los problemas identificados por IPN (2013) correspondía a la falta interconexión de colectores, que implicaba la llegada un flujo limitado e intermitente de aguas residuales (10 l/s) que dificultaba la estabilización del proceso de tratamiento.

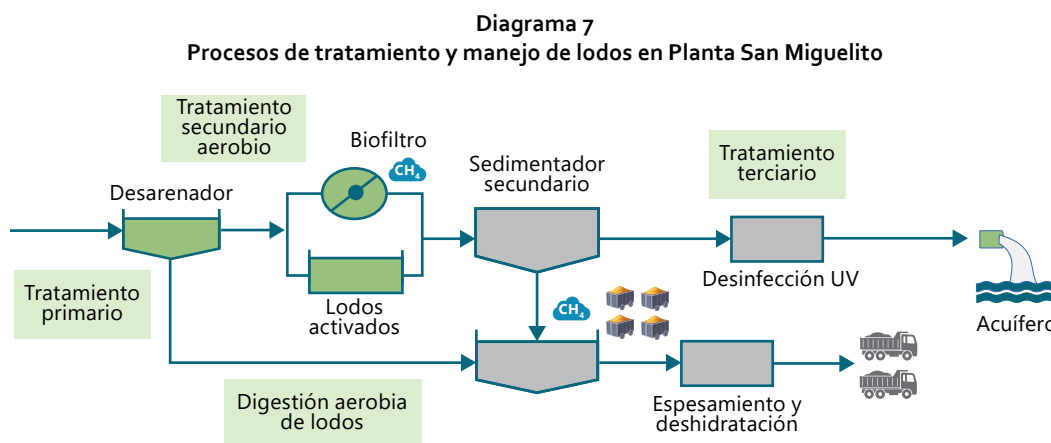
Es relevante señalar que en diciembre de 2022 se abrió un proceso de licitación para ampliar la capacidad de la PTAR Bicentenario, pasando de 120 l/s a 240 l/s¹⁵. Además, tras una visita técnica realizada en julio de 2023 por el equipo de la CEPAL, se confirmó que esta ampliación, con el objetivo de cumplir con el nuevo estándar de vertimiento de nitrógeno establecido por SEMARNAT, incorporará un proceso de nitrificación-desnitrificación que complementará el proceso de tratamiento biológico actual.

d) PTAR San Miguelito

La PTAR San Miguelito entró en operación en 1980, y fue ampliada en abril del 2012 a una capacidad instalada de 220 l/s. Se encuentra ubicada en la Isla de Cozumel, Estado Quintana Roo, y al igual que las plantas Centenario y Bicentenario, es operada por CAPA. En la actualidad trata un caudal promedio de 160 l/s y en el afluente se registra concentración promedio de 400 miligramos de DBO por litro de agua residual, equivalente a una carga de cerca de 2.018 toneladas por año.

¹⁵ A través de la Convocatoria N° CAPA-DG-005-2022.

El proceso de tratamiento de aguas residuales es similar al de la PTAR Bicentenario, es decir, el agua pasa por un proceso de pretratamiento (filtrado de sólidos), tratamiento secundario (a partir de filtro percolador y un reactor de lodos activados convencionales), clarificación y desinfección a partir de rayos ultravioleta y desinfección adicional con Hipoclorito de Sodio o calcio (CAPA, 2022). Los lodos primarios y secundarios son estabilizados aeróbicamente y deshidratados con filtro de banda (IPN, 2013) (véase diagrama 7).



Fuente: Informe 2013—SEMARNAT—CONAGUA.

2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica

A partir de los parámetros documentados en el cuadro 9, se ha podido estimar que las PTAR San Martín de las Pirámides, Centenario, Bicentenario y San Miguelito, reciben una carga orgánica anual expresada en DBO₅ estimada en 823 ton/año, 980 ton/año, 859 ton/año y 2.018 ton/año respectivamente¹⁶. Esta carga orgánica, al pasar por las diferentes fases de tratamiento de las PTAR y al adicionar unidad de digestión anaerobia de lodos aerobios en las plantas de Centenario, Bicentenario y San Miguelito, genera emisiones estimadas en 1.993.358 m³ de metano al año, es decir, más de 28.047 toneladas de CO₂ equivalente¹⁷ al año (ver cuadro 10).

Cuadro 10
Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas de México
(En metros cúbicos)

Nombre	Metano emitido				Metano captable			
	Anaerobia	Aerobia	Lodos	Total	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Lodos	Total
San Martín de las Pirámides	230 465	629		231 094	207 419	-		207 419
Centenario	-	5 266	439 102	444 368	-	-	395 192	395 192
Bicentenario	-	3 920	398 930	402 850	-	-	359 037	359 037
San Miguelito	-	10 845	904 200	915 045	-	-	813 780	813 780
Total	230 465	20 660	1 742 233	1 993 358	217 790	-	1 568 009	1 775 428

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

¹⁶ Estos cálculos fueron realizados y validados por autoridades y técnicos responsables de la operación de las PTAR indicadas, en el marco de Taller de Capacitación celebrado por CEPAL en julio de 2023 en Quinta Roo, lo cual incluyó visita técnica a la PTAR Bicentenario.

¹⁷ Equivale a las emisiones de CO₂ de 2,9 millones de mexicanos en un día.

Como se ha mencionado, no todo el metano generado en el proceso es aprovechable. Por ejemplo, en las PTAR que emplean tecnologías aerobias (de lodos activados, filtros percoladores, o duales) se generan muy pequeñas emisiones en la fase de tratamiento que no es posible captar. En estos casos, solo se puede captar el metano generado a partir de la digestión anaerobia de lodos. En las PTAR que emplean tecnologías anaerobias/aerobias aplica este mismo principio.

De la misma forma, debido a la existencia de ineficiencias en los sistemas de ruteo y captura del metano, solo es posible aprovechar hasta un 90% del metano generado. Esto significa, para el caso de las PTAR de las localidades seleccionadas de México, que solo se podrá captar un total de 1.775.428. m³ de metano, con un contenido energético de 17.804 MWh/año, equivalente al consumo de 8.680 habitantes (con un consumo promedio de 2.051 KWh/año). De la misma forma, tomando en cuenta las eficiencias de los sistemas de cogeneración, solo serían aprovechables 6.232 MWh de energía eléctrica y 7.122 MWh de energía calórica, al año (ver cuadro 11).

Cuadro 11
Potencial energético de las PTAR analizadas en México

Nombre	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Metano		Contenido energético (MWh/año)	Cogeneración de energía	
			Generado (M ³ /año)	Recuperable (M ³ /año)		Eléctrica (MWh/año)	Calórica (MWh/año)
San Martín de las Pirámides	70,0	45,0	231 094	207 419	2 068	724	827
Centenario	180,0	120,0	444 368	395 192	3 940	1 379	1 576
Bicentenario	120,0	60,0	402 850	359 037	3 580	1 253	1 432
San Miguelito	220,0	160,0	915 045	813 780	8 113	2 840	3 245
Total	590,0	385,0	1 993 358	1 775 428	17 701	6 195	7 080

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

En el caso específico de San Martín de las Pirámides, dada la tecnología anaerobia/aerobia que emplean para el tratamiento de aguas residuales, se identifica un potencial importante para el aprovechamiento energético del metano, pues allí el consumo energético de la PTAR se ha estimado en 844.165 KWh/año, abarcando un 62% de los costos anuales de operación de la PTAR (Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos, s.f.). Si se realizan los desarrollos necesarios para el aprovechamiento energético del metano generado, sería factible proveer el 86% de la energía eléctrica requerida por la planta para operar. Esto, sin considerar la posibilidad de aprovechar la energía calórica recuperable para el calentamiento del reactor anaerobio lo cual incrementaría la eficiencia de operación de la PTAR.

Ahora bien, dado el bajo nivel de utilización que presentan algunas de estas PTAR, vale la pena preguntarse cual será el nivel de emisiones futuras, cuando esta infraestructura se logre utilizar al 80% de su capacidad. Los resultados indican que, en el momento en que estas PTAR alcancen ese nivel de utilización—considerando los mismos niveles de concentración de DBO documentados en el cuadro 9—, se esperarían emisiones anuales de 2.472.321 m³ de metano, de los cuales 2.201.969 m³ serían aprovechables para generar 7.684 MWh de energía eléctrica y 8.781 MWh de energía calórica (ver cuadro 12).

Es decir, globalmente se incrementaría la generación de energía eléctrica y calórica en un 24%, siendo más notorio el crecimiento en las PTAR Bicentenario y San Martín de las Pirámides.

Cuadro 12
Potencial energético de las PTAR analizadas en México utilizando el 80% de su capacidad instalada

Nombre	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Metano		Contenido energético (MWh/año)	Cogeneración de energía	
			Generado (M ³ /año)	Recuperable (M ³ /año)		Eléctrica (MWh/año)	Calórica (MWh/año)
San Martín de las Pirámides	70,0	56,0	287 969	258 121	2 573	901	1 029
Centenario	180,0	144,0	533 242	474 230	4 728	1 655	1 891
Bicentenario	120,0	96,0	644 560	574 460	5 727	2 005	2 291
San Miguelito	220,0	176,0	1 006 549	895 158	8 925	3 124	3 570
Total	590,0	472,0	2 472 321	2 201 969	21 954	7 684	8 781

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

3. Estimación de los costos de inversión

Para calcular los beneficios económicos que reportaría el aprovechamiento del metano producido en el tratamiento de aguas residuales, es necesario tener en cuenta los costos de inversión necesarios para capturar y transformar el metano en energía (ver cuadro 13).

Cuadro 13
Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de México
(En dólares corrientes)

Concepto	San Martín de las Pirámides ^a	Centenario	Bicentenario	San Miguelito	Total
Espesador de lodos aerobios	N/A	122 600	137 800	180 800	441 200
Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)	N/A	6 100	6 900	9 000	22 000
Digestor de lodos	N/A	0	0	0	0
Adecuación digestor aerobio de lodos en digestor anaerobio	N/A	342 920	392 320	518 760	1 254 000
Soplador centrífugo	N/A	1 600	1 600	1 600	4 800
Tubería de biogás ^b	9 000	7 500	7 500	7 500	30 000
Antorcha ("flare")	34 080	28 400	28 400	28 400	113 600
Gasómetro de biogás	81 720	68 100	68 100	68 100	272 400
Desulfurizador	20 880	17 400	17 400	17 400	69 600
Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	51 040	41 700	41 700	41 700	166 800
Motogenerador a biogás	309 447	459 974	455 883	699 861	1 925 165
Total	505 167	1 096 294	1 157 603	1 573 121	4 332 185

Fuente: Elaboración propia.

^a Costos suministrados por CAEM (2023).

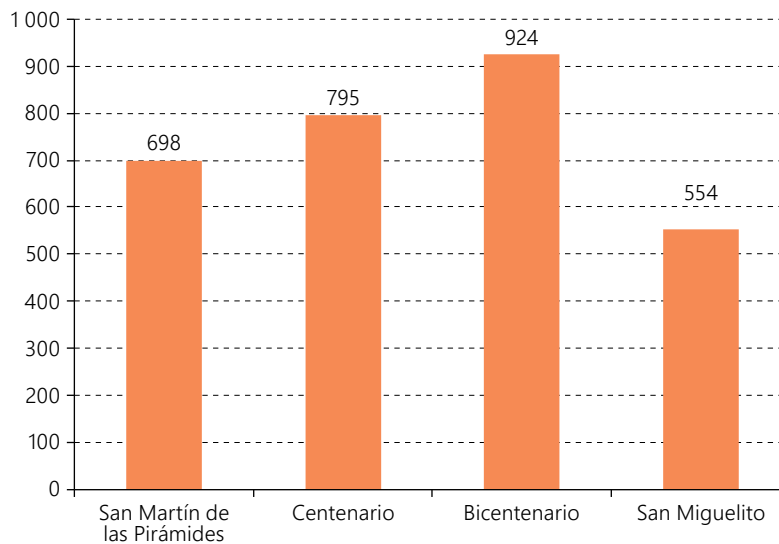
^b Se asume tirada máxima de 50 m.

En las PTAR aerobias que no tienen sistemas de bombeo y espesamiento de lodos, se requerirá desarrollar una inversión para estos fines¹⁸. De otra parte, teniendo en cuenta que las tres PTAR de Quintana Roo cuentan con digestores aerobios de lodos, se propone la adecuación de estas estructuras para convertirlas en digestores anaerobios, lo cual contempla en esencia, el cerramiento de los tanques para que funcionen bajo condiciones anaerobias y otros ajustes¹⁹.

Adicional a lo anterior, deberá incurrirse en la instalación de un sistema de ruteo, almacenamiento y purificación del biogás y un motogenerador de energía²⁰. En el caso de la planta San Martín de las Pirámides, se requerirán las mismas inversiones, con la única excepción de que no será necesario adecuar un digestor anaerobio de lodos.

En resumen, debería realizarse una inversión estimada en USD 4,33 millones, correspondiente a USD 563,8 por cada MWh²¹ de energía eléctrica generable al año por estas PTAR. Si se considera una vida útil de 20 años, el costo de inversión por cada MWh generable a lo largo de la vida útil correspondería a USD 28,2. La tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales, así como las diferencias en términos de utilización de la capacidad instalada y de carga orgánica que ingresa al sistema, determina un costo de inversión mayor para las PTAR Bicentenario, Centenario y San Miguelito respectivamente (ver gráfico 7 y gráfico 8).

Gráfico 7
Costo de inversión por cada MWh de energía eléctrica generable en el año en PTAR seleccionadas de México
(En dólares corrientes/MWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

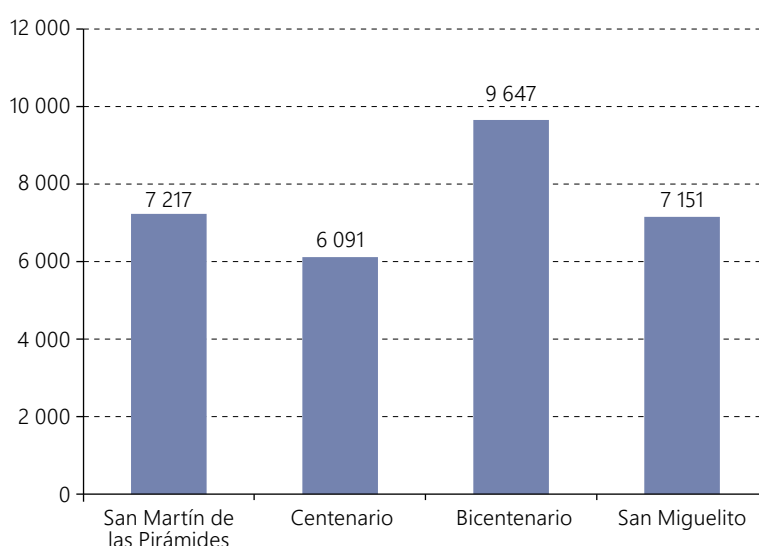
¹⁸ Dado que las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito —según información reportada por CAPA y CAEM— cuentan con cárcamos de recirculación de lodos y espesadores de lodos en funcionamiento, no habría que incurrir en este desarrollo.

¹⁹ Esta inversión en adecuación correspondería por lo menos un 40% de la inversión que representa la construcción de un reactor anaerobio nuevo.

²⁰ Adicionalmente, podría considerarse la instalación de un circuito de aprovechamiento de la energía calórica producida por el motogenerador, que puede ser empleada para los equipos de aireación del proceso de LAC y/o en el secado de lodos. Además, si la PTAR genera excedentes de energía, se deberá considerar la instalación de una estación de transformación eléctrica para conectarse a la red y comercializar los excedentes.

²¹ De acuerdo con IRENA (2021) los costos promedio en el 2020 de generación por fuente corresponden a: energía fotovoltaica: 0,057 USD/kWh; energía eólica terrestre: 0,039 USD/kWh, energía eólica marina: 0,084 USD/kWh y energía geotérmica: ha oscilado entre 0,071 USD/kWh y 0,075 USD/kWh.

Gráfico 8
Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de PTAR seleccionada en México
(En dólares corrientes/litro)



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano

Para la evaluación financiera del proyecto, se parte de un sencillo supuesto: la energía generada en la PTAR será empleada en la operación de la planta, sustituyendo la energía proveniente de fuentes externas. Esta sustitución de energía le generará ahorros al organismo operador de la planta, en la medida en que ya no tendrá que destinar cuantiosos recursos para el pago de energía eléctrica. En específico, en el caso de las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito se evitará un costo de USD 0,167/KWh, que corresponde a la tarifa de energía para el sector no residencial en México, según la información documentada por GlobalPetrolPrices (2022). Respecto de San Martín de las Pirámides, de acuerdo con la información reportada por CAEM, dicho costo asciende a USD 0,19/KWh.

Con los costos de energía indicados anteriormente, se generarían ahorros anuales estimados en USD 1.049.172 (ver cuadro 14).

Cuadro 14
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de México
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (L/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial (P.E) ^a	Ahorro anual	VAN Ahorros (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
San Martín de las Pirámides	45,0	30 240	505 167	16,7	135 420	1 152 903	27	2,28	4,92
Centenario	120,0	29 623	1 096 294	37,0	230 297	1 960 646	21	1,79	6,84
Bicentenario	60,0	14 811	1 157 603	78,2	209 228	1 781 273	17	1,54	8,65
San Miguelito	160,0	39 497	1 573 121	39,8	474 228	4 037 366	30	2,57	4,38
Total	385,0	114 171	4 332 185	37,9	1 049 172	8 392 189	24	2,06	5,69

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

^a Inversiones por persona equivalente (por habitante atendido).

Al realizar la evaluación financiera, utilizando una tasa de descuento del 10% y en un horizonte de 20 años, se identifica que las inversiones realizadas en el conjunto de las 4 plantas, reportan un ingreso estimado a 20 años de USD 8,39 millones, representando un beneficio promedio de 2,06 veces lo invertido y una tasa interna de retorno del 24%.

En forma individual, se identifica que el aprovechamiento de metano y la generación de energía eléctrica en la PTAR San Martín de las Pirámides, presentaría un retorno de 2,28 veces lo invertido, equivalente a una TIR del 27% que permitiría recuperar la inversión en cerca de seis años. Del mismo modo, en la PTAR San Miguelito, la de mayor capacidad del conjunto, se estima un retorno de 2,56 veces lo invertido, con una TIR del 30% y 4,4 años de periodo de recuperación de la inversión. En la PTAR bicentenario, la recuperación de la inversión se presentaría únicamente hasta cerca del año 9, mientras en la PTAR San Miguelito se alcanzaría a recuperar la inversión a mediados del año 4.

Se debe tener en cuenta que esta evaluación financiera, no contempla un incremento en los costos operativos derivados del aprovechamiento energético del metano, por cuanto estos podrían ser compensados considerando los siguientes factores: (i) el empleo de la energía calorífica proveniente del proceso de aprovechamiento de metano para el calentamiento tanto de reactores de tratamiento biológico en el tren de aguas o de los digestores anaerobios en el tren de lodos, lo cual puede contribuir a disminuir los costos de suministro de energía para estas etapas de tratamiento, y (ii) la generación de lodos en el proceso anaeróbico es de seis a ocho veces menor que la producida en el proceso aeróbico, lo cual disminuye significativamente los costos de tratamiento y disposición final del tren de lodos (Pavlostathis, 2011); estos costos pueden representar hasta el 50% de los costos operativos de una PTAR con tecnología aerobia (Chao & Tianfeng, 2013).

A su vez, es necesario anotar que esta evaluación financiera se ha realizado a partir de un caudal tratado invariable en el tiempo, lo cual se constituye en un supuesto muy fuerte, si se toma en cuenta que el crecimiento urbanístico y el incremento de conexiones a las redes de alcantarillado, necesariamente trae consigo un incremento en los caudales que ingresan a las depuradoras de aguas residuales. A continuación se presentan unos resultados alternativos, manteniendo todas las variables constantes y suponiendo un nivel de utilización del 80% de la capacidad instalada de cada PTAR (ver cuadro 15).

Cuadro 15
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de México
suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (L/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial (P.E) ^a	Ahorro anual	VAN Ahorros (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
San Martín de las Pirámides	56,0	37 632	505 167	13,4	169 035	1 439 094	33	2,85	3,77
Centenario	144,0	35 547	1 096 294	30,8	276 356	2 352 275	25	2,15	5,47
Bicentenario	96,0	23 698	1 157 603	48,8	334 764	2 850 038	29	2,46	4,56
San Miguelito	176,0	43 447	1 573 121	36,2	521 650	4 441 103	33	2,82	3,81
Total	472,0	140 324	4 332 185	30,9	1 301 806	11 083 010	30	2,56	4,40

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por CAPA y CAEM.

^a Inversiones por persona equivalente (por habitante atendido).

En este escenario, este grupo de PTAR podría producir un estimado de 7.684 MWh/año de energía eléctrica, a partir de la captación y el aprovechamiento de 2.201.969 m³ de metano al año. Esta generación de energía eléctrica podría generar ahorros globales estimados en USD 1.301.806. por año, con ingresos totales descontados a una tasa del 10% durante 20 años de USD 11.083.010 millones, que, al ser contrastados con el costo de inversión, representarían una relación beneficio costo de 2,56 veces lo invertido.

Aquí se destaca el mayor potencial de la PTAR San Martín de las Pirámides para aprovechar el metano, determinado en gran parte por la tecnología utilizada para tratar las aguas residuales, así como de la PTAR San Miguelito, dado su mayor tamaño o capacidad de tratamiento. Por otro lado, se destaca en este escenario, la existencia de viabilidad financiera del aprovechamiento del metano en todas las PTAR de Quinta Roo, ya que al utilizar el 80% de su capacidad instalada e incorporando procesos de digestión anaerobia de lodos aerobios, se lograría recuperar el costo de inversión entre los años 3 y 6. Finalmente, si se realizara una agregación de proyectos, de acuerdo con el operador de las plantas, se podrá identificar que CAPA y CAEM percibirían unos beneficios globales, superiores a los costos de inversión en los que se debe incurrir.

5. Beneficios ambientales y sociales del aprovechamiento del metano

Además de la evaluación de la viabilidad financiera del aprovechamiento de metano en las 4 PTAR seleccionadas en México, uno de los objetivos de la investigación es evaluar los beneficios ambientales y sociales del aprovechamiento de metano. A continuación, se realiza una estimación de la reducción de emisiones asociadas a la implementación de cada uno de los proyectos. De la misma forma, se realiza una aproximación a los efectos macroeconómicos que se desprenden de las inversiones a realizar en estas PTAR, haciendo énfasis en la generación de empleo, y en su impacto en el Valor Agregado Bruto del país. Esta estimación, realizada a partir de MIP del año 2011 desarrolladas por la División Económica de Comercio Internacional e Integración de la CEPAL.

a) Reducción de emisiones

A pesar de las limitaciones de información para estimar el impacto ambiental de los proyectos propuestos en este documento, es factible utilizar, en el caso de San Martín de las Pirámides, el consumo energético registrado por Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos (s.f.) de 844,165 kWh/año como punto de partida. A partir de este consumo y considerando un factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de 0,435 tCO₂e/MWh en el año 2022²², es posible obtener las emisiones asociadas al consumo de energía de esta PTAR. Además, considerando que el metano emitido por esta PTAR (documentado en el cuadro 10) no se aprovecha actualmente y se quema antes de su emisión, se pueden sumar estos dos componentes para obtener las emisiones totales en el escenario base (las emisiones de CO₂ asociadas con la quema de biogás se determinan con base en un factor de 2,75 Kg CO₂eq/Kg CH₄ quemado).

En el caso de las demás PTAR, dado que no se dispone de información sobre su nivel de consumo energético actual y considerando que son sistemas aerobios que utilizan tecnologías LAC, se emplea un parámetro de consumo de energía de 32 kWh/hab./año, documentado por Nolasco (2010). Así, tomando en cuenta que estas PTAR realizan una digestión aerobia de lodos en su escenario actual, solo se deben considerar las emisiones asociadas al tratamiento de aguas residuales en condiciones aerobias (ver columna 3 del cuadro 10) para la estimación de emisiones en el escenario base. En cuanto a la estimación de emisiones en el escenario que contempla la implementación del proyecto, se consideran dos efectos. El primero implica la reducción de emisiones producto de la captación y aprovechamiento de los volúmenes de metano que antes eran emitidos. El segundo efecto corresponde a la reducción de la demanda de energía eléctrica debido a la generación interna a partir del aprovechamiento del metano. Los resultados se ilustran en el cuadro 16.

²² Publicado por la Comisión Reguladora de Energía: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806468/4_—Aviso_FE_022__1_.pdf.

Cuadro 16
Reducción de emisiones en las PTAR de estudio de México
(En toneladas de CO₂ equivalentes al año)

Nombre	Escenario base (1)			Escenario de proyecto (2)			Reducción emisiones (2-1)
	Consumo Energético	Emisiones Metano	Emisiones totales	Consumo-Energía generada	Emisiones Metano	Emisiones totales	
San Martín de las Pirámides	367	426	793	52	333	385	-407,6
Centenario	412	74	486	0	692	692	205,5
Bicentenario	206	55	261	0	616	616	355,1
San Miguelito	550	153	702	0	1 425	1 425	722,4
Total	1 536	3 533	2 243	52	3 066	3 119	875,4

Fuente: Elaboración propia.

En el contexto de las PTAR que utilizan tecnologías aerobias con digestión aerobia de lodos en su escenario base, se debe tener en cuenta una particularidad al considerar la reducción de emisiones de metano y la implementación de un sistema de digestión anaerobia de lodos. A pesar de que la instalación de un digestor anaerobio de lodos genera un aumento en las emisiones de metano, la introducción de un sistema de captación y aprovechamiento de este permite capturar aproximadamente el 90% de este gas para su utilización como energía eléctrica. Sin embargo, una pequeña cantidad de metano se emitirá a la atmósfera debido a las posibles ineficiencias en los sistemas de captación y enrutamiento del gas. Si se suma este metano a las emisiones generadas durante la fase de tratamiento de aguas residuales, que se consideran marginales, se observará un incremento en las emisiones totales. En el caso de tecnologías anaerobias de tratamiento de aguas residuales que incorporan el proceso de aprovechamiento del biogás generado, se presenta un balance positivo por la reducción significativa de las emisiones de metano de los reactores o unidades anaerobias (aproximadamente del 51%—ver PTAR San Martín de las Pirámides, cuadro 16). Así, el resultado final dependerá del grado en que se logre sustituir la energía del sistema eléctrico nacional por la energía generada internamente en la PTAR y la diferencia en el potencial de reducción de emisiones de procesos bajo tecnología anaerobia en el tren de aguas frente al aprovechamiento de lodos provenientes de procesos bajo tecnología aerobia en el tren de aguas.

Los resultados presentados, indican que la implementación de los proyectos podría potencialmente reducir las emisiones en aproximadamente 407,6 toneladas de CO₂ equivalente por año. Sin embargo, en las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito se observa un incremento en las emisiones debido a que la energía aprovechada no logra compensar completamente el efecto del aumento en las emisiones derivado de las posibles ineficiencias en los sistemas de captación, enrutamiento y almacenamiento del metano.

Es importante destacar que estos resultados están limitados por la disponibilidad de información. Es probable que, al considerar los beneficios del aprovechamiento de la energía calórica, así como los factores de emisión adicionales asociados, por ejemplo, al transporte y disposición final de los grandes volúmenes de lodos derivados de la digestión aerobia de lodos en las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito, la reducción estimada de emisiones sea mayor.

b) Impacto socioeconómico

Para estimar el impacto de las inversiones en las 4 PTAR abordadas en este estudio, sobre la generación de empleos verdes y sobre el valor agregado bruto, se utilizó el simulador desarrollado por Saravia Matus y otros (2022a) y Saravia Matus y otros (2023a)²³, a partir de las MIP del 2011 elaboradas por la División de Comercio Internacional e Integración de la CEPAL. Este simulador permite estimar el impacto directo de la inversión en saneamiento y su efecto contagio sobre el resto de las industrias que conforman la economía mexicana, lo que permite estimar los efectos directos e indirectos en el empleo y el valor agregado, derivados de las inversiones en agua y saneamiento. (Ver cuadro 17 y cuadro 18).

²³ Se pueden observar los detalles metodológicos en Saravia Matus, y otros (2023a).

Cuadro 17
Impacto de las inversiones sobre el valor agregado bruto en México

Concepto	En porcentajes	En millones de dólares
Valor agregado	0,00034	4,03
Efecto directo	0,00028	3,30
Efecto indirecto	0,00006	0,73

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus y otros (2023a).

Cuadro 18
Impacto de las inversiones sobre el empleo en México

Concepto	En porcentajes	Número de empleos
Nuevos empleos	0,00029	165
Directos	0,00026	146
Indirectos	0,00003	19

Fuente: Elaboración propia con base en Saravia Matus y otros (2023a).

Los resultados ilustrados evidencian que la ejecución de inversiones por USD 4,33 millones en el aprovechamiento del metano para la generación de energía eléctrica en estas 4 PTAR, generaría un incremento del valor agregado en USD 4,03 millones. También pone de manifiesto que la realización de las inversiones propuestas configuraría la creación de 165 nuevos empleos verdes, de los cuales 146 corresponden a empleos directos y 19 corresponden a empleos indirectos²⁴.

²⁴ Es decir, se genera aproximadamente un empleo por cada USD 26.000 invertidos. En Colombia, según (Mejía & Delgado, 2020) \$1 billón de pesos de inversión en infraestructura genera 28.000 empleos en la economía. Esto es aproximadamente 1 empleo por cada USD 9.600 invertidos.

III. Potencial de recuperación de nutrientes en PTAR de América Latina y el Caribe

Los fertilizantes desempeñan un papel crucial en la agricultura moderna al suministrar nutrientes esenciales, entre ellos, los tres principales: N, P y K²⁵. La producción agrícola de ALC depende en gran medida de la importación de fertilizantes producidos en otras regiones lo cual la coloca en una situación de alta vulnerabilidad frente a conflictos geopolíticos que pueden ocasionar desabastecimiento y aumentos repentinos en sus precios, y consecuentemente, en el de los alimentos, como quedó patente en el año de 2022. Las rocas fosfóricas, esenciales para la producción de fertilizantes, son recursos minerales limitados y cuyo suministro global está expuesto a riesgos, al estar muy concentrado en regiones inestables (Sahara Occidental).

Al mismo tiempo, las aguas residuales domésticas y las provenientes de la industria agropecuaria son ricas en algunos de esos nutrientes (N y P). El vertido de aguas residuales sin tratar, o insuficientemente tratadas, hace que gran cantidad de estos nutrientes sean descargados a los cuerpos de agua receptores, provocando su deterioro ambiental. La gestión sostenible de los nutrientes contenidos en las aguas residuales es necesaria para mitigar el grave problema ambiental de la eutrofización y puede ayudar a garantizar la seguridad alimentaria.

Un camino para recuperar estos nutrientes corresponde al simple aprovechamiento de los lodos activados digeridos, los cuales una vez secados y neutralizada la presencia de patógenos, suelen recibir la denominación de "biosólidos" y son ricos en nutrientes (N y P) y en materia orgánica. Pueden ser inclusive sometidos a un proceso de compostaje para mejorar sus propiedades fertilizantes y de mejora de suelos. No obstante, el simple aprovechamiento de los lodos no mejora la calidad del efluente de PTAR.

También existen procesos mucho más sofisticados de aprovechamiento de los nutrientes en las aguas residuales, como la precipitación de sales de N y P (estruvita) o de P (hidroxiapatita, brushita, vivianita) a partir de lodos y de corrientes líquidas del proceso de tratamiento. Estas sales son fertilizantes de alto valor añadido, fáciles de transportar y comercializar. Este tipo de aprovechamiento tiene la ventaja de mejorar la calidad del efluente que sale de la PTAR, logrando concentraciones bajas de N y P, lo que la configura en una gran oportunidad de economía circular, ya que al recuperar el P que sería vertido a los cuerpos de agua (y que podría causar un problema ambiental), se contribuye a preservar las reservas limitadas de roca fosfórica, logrando así una economía circular del P, en vez de una economía lineal (extracción-uso-descarte) y reduciendo la dependencia de importaciones.

²⁵ Además de estos, existen otros nutrientes fundamentales, como calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno y boro, que también son vitales para el desarrollo óptimo de las plantas.

Además, a diferencia de los biosólidos, la precipitación de estruvita permite obtener un producto homogéneo, libre de impurezas y con composición conocida, lo que facilita su mezcla con otros compuestos fertilizantes y el cálculo del dosaje correcto para su uso en campos agrícolas. A su vez, debe anotarse que la precipitación de estas sales puede complementar el aprovechamiento agrícola de lodos. Al recuperar N y P por medio de sales como estruvita, los biosólidos que se generen en la PTAR serán menos ricos en nutrientes, pero continuarán teniendo un contenido de materia orgánica interesante para su uso en mejoramiento de suelos.

En materia de huella de carbono, hay que anotar que el balance de energía y de insumos requeridos en el proceso de producción de sales fosfatadas en PTAR suele ser menor que el de los procesos industriales de producción de fertilizantes nitrogenados y fosfatados. Estudios recientes en la India calcularon que, en ese país, al substituir fertilizantes tradicionales como urea y DAP por estruvita, se reducen las emisiones de CO₂ en 53%, evitándose 663 kg de CO₂-eq por hectárea (Gowd y otros, 2022). Estos valores pueden variar bastante dependiendo del país. En Estados Unidos, se realizó un análisis de ciclo de vida en una PTAR que realizaba remoción biológica de nutrientes y aplicación de biosólidos en campos agrícolas, y que decidió implementar la recuperación de nutrientes mediante precipitadores de estruvita. El resultado no fue tan positivo en cuanto a las emisiones de carbono, aunque hubo una mejora en la mayoría de los indicadores de impacto ambiental de la PTAR (Sena y otros, 2021).

Además, la huella de carbono del fertilizante a base de sales fosfatadas es aún menor si consideramos los beneficios que su precipitación controlada ocasiona en la operación de las PTAR:

- Reducción de las incrustaciones de estruvita que ocurren de forma natural en tuberías y equipamientos. Estas incrustaciones pueden causar paradas en la línea de lodos, además de ocasionar gastos con manutención preventiva y adición de desincrustantes químicos.
- Reducción en la cantidad de insumos químicos consumidos en la PTAR, en el caso de que ésta realice precipitación química de P.
- Mejora en la deshidratación del lodo. Como consecuencia, reducción del volumen de lodo a ser transportado al sitio de disposición y, por tanto, reducción del consumo de combustible y emisiones de CO₂.

Estas mejoras operativas, además de beneficios ambientales, pueden traer importantes reducciones de costes que compensen la inversión en los sistemas de recuperación de nutrientes. De hecho, la viabilidad económica de instalar un sistema de precipitación de sales fosfatadas suele depender, más que de la venta de las sales, del beneficio asociado a la reducción de costes operacionales.

En consideración con lo anterior, en este capítulo se busca proporcionar una guía de referencia que sirva al conjunto de profesionales del sector de agua y saneamiento para identificar el potencial de viabilidad de la recuperación de nutrientes en PTAR de porte grande y medio. Tras hacer una revisión del contexto normativo y de las alternativas disponibles para recuperar nutrientes, se otorga especial énfasis al aprovechamiento de biosólidos y a la precipitación de sales fosfatadas —en particular la estruvita— por ser ésta la tecnología que presenta mayor madurez y potencial de viabilidad económica. Se ofrece una guía para la estimación del beneficio-costado de estos sistemas y, finalmente, un estudio del potencial de la recuperación de nutrientes en tres regiones metropolitanas de ALC: San Salvador, Panamá, y Bogotá.

A. Marcos normativos para la descarga y el aprovechamiento de nutrientes de aguas residuales

1. Tendencia hacia una normativa más rígida sobre descargas de nutrientes

La preocupación por la eutrofización está impulsando cambios en las normativas ambientales sobre el vertido de aguas residuales, con una tendencia global hacia regulaciones más estrictas en cuanto a la descarga de nutrientes en cuerpos receptores. En la mayoría de los países, las normas establecen límites

para las concentraciones máximas permisibles de nitrógeno y fósforo totales en los efluentes. En la UE, se están debatiendo normativas más rigurosas con valores propuestos de 6 mg/l de N y 0,5 mg/l de P para 2035. En Estados Unidos, los límites varían entre 20 y 10 mg/l de N y alrededor de 1 mg/l de P, llegando a ser más estrictos en cuerpos de agua de valor excepcional. Japón tiene los límites más altos, permitiendo hasta 60 mg/l de N y 8 mg/l de P, aunque se prevé una revisión debido a la eutrofización avanzada. En India, se han establecido nuevos valores de 10 mg/l de N y 2 mg/l de P en 2019. China ha implementado estándares nacionales y locales, con un estándar nacional de 15 mg/l de N y 0,5 mg/l de P, aunque algunas ciudades como Beijing permiten concentraciones máximas de hasta 1,5 mg/l de P (ver cuadro 19).

Cuadro 19
Valores máximos permisibles de N y P en las descargas de efluentes a cuerpos receptores

País	Límite de Nitrógeno Total (Mg/L)	Límite de Fósforo (Mg/L)	Norma
Unión Europea (todo tipo de cuerpos de agua)	6	0,5	Propuesta de Actualización de la Norma de la UE (2023)
Unión Europea (actual, municipios < 100.000 habitantes)	15	2	Directiva 91/271/CEE
Unión Europea (actual, municipios > 100.000 habitantes)	10	1	Directiva 91/271/CEE
Estados Unidos de América	10-20	1	NPDS. Varía según cada estado
Japón	60	8	NES 2015
India	10	2	NGT (2019)
China	15	0,5	GB 18.918-2002
Argentina	15-35	1-5	Varía según cada provincia
Chile	10-50	2-15	Decreto 90 (07/03/2000)
Cuba	5-20	2-10	NC 27:2012
Ecuador	50	10	97/A (2015)
El Salvador (todo tipo de cuerpos de agua)	50	15	RTS 13.05.01:18 (2019)
Guatemala	5-20	3-10	A.G. N°236-2006 A.G. N°12-2011
Honduras	-	5	Acuerdo N°058 (1996)
Jamaica (PTAR anterior a 2013)	30	10	RCWS Regulations, 2013
Jamaica (PTAR posterior a 2013)	10	4	
México (cuerpos fluviales)	25	15	NOM-001-Semarnat-2021 (11/03/2022)
México (lagunas y cárstico)	15	5	
México (cuerpos de agua marinos)	25	15	
Nicaragua	45	15	Decreto 21-2017
Panamá (áreas del Canal de Panamá)	15	10	Norma 2610-AAA-111 (19/08/2020)
Panamá (todo tipo de cuerpos de agua)	15	10	RT DGNTI-COPANIT 35-2019 (27/06/2019)
Paraguay	40	4	Res. 222/02 SEAM (2002)
Rep. Dominicana	18-50	1-8	Norma Aguas Residuales 2001
Uruguay	-	5	Decreto 253/979 (1979)
Venezuela (República Bolivariana de)	40	10	Norma Oficial de 1995

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la normativa vigente en ALC, se verifica una gran disparidad en los valores límite permitidos. En el Gráfico 9 y el Gráfico 10 se muestran los valores máximos permisibles en una serie de países de ALC. Algunos países indican valores únicos mientras que otros tienen valores diferentes dependiendo del tipo de cuerpo receptor (fluvial, laguna, marino). Por ejemplo, la norma vigente en Chile indica hasta 4 valores máximos permisibles para el P, según el cuerpo receptor sea: fluvial con dilución (15 mg/l P), fluvial sin dilución (10 mg/l P), marino (5 mg/l P), o lacustre (2 mg/l P).

En otros países, además, los valores pueden variar dependiendo de normativas específicas de diferentes estados, municipios, o cuencas hidrográficas. Por ejemplo, en Argentina hay bastante autonomía entre las provincias y cuencas hidrográficas para establecer los límites de N y P en los efluentes. Así, en la Provincia de Santa Fe los límites de calidad de vuelcos son 15 mg/l de N y 2 mg/l de P, mientras que en la Provincia de Buenos Aires son 35 mg/l de N y 1 mg/l de P. Ya en el caso de la cuenca del Riachuelo-Matanzas, el río más contaminado del país, que atraviesa la Provincia de Buenos Aires y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el valor límite permitido es de 5 mg/l de P.

Tampoco es raro encontrarse con casos de límites definidos para vertidos en cuerpos receptores específicos, de especial relevancia o ya deteriorados. Un ejemplo lo tenemos en Guatemala, país que está avanzando hacia una normativa cada vez más rigurosa, y que obliga a que para el 2031 los vertidos de las municipalidades deban respetar unos límites de 20 mg/l de N y 10 mg/l de P. Sin embargo, para el Lago de Atitlán, que ha sufrido deterioro por eutrofización, son exigidos unos límites bastante más estrictos: 5 mg/l de N y 3 mg/l de P. (Ver gráfico 9).

En Perú²⁶, en el Estado Plurinacional de Bolivia²⁷, y en Brasil²⁸ los valores límite de N y de P en el efluente se establecen conforme la categoría o clase del cuerpo receptor. La clase del agua depende de sus usos potenciales, por ejemplo, si el agua puede ser potabilizada y destinada para abastecimiento humano, o destinada para pesca, o para uso recreacional, etc. Cada clase de agua tiene sus estándares de calidad propios, donde están especificadas las concentraciones de N y P.

Colombia se destaca por ser muy poco exigente con los nutrientes vertidos en el efluente de PTAR. La norma colombiana distingue entre aguas residuales domésticas y no domésticas (industrias y otras actividades productivas). Para aguas residuales domésticas vertidas por servicios de saneamiento municipal, la norma no establece límites en la concentración de N y P; sólo indica la obligatoriedad de realizar análisis y reporte.

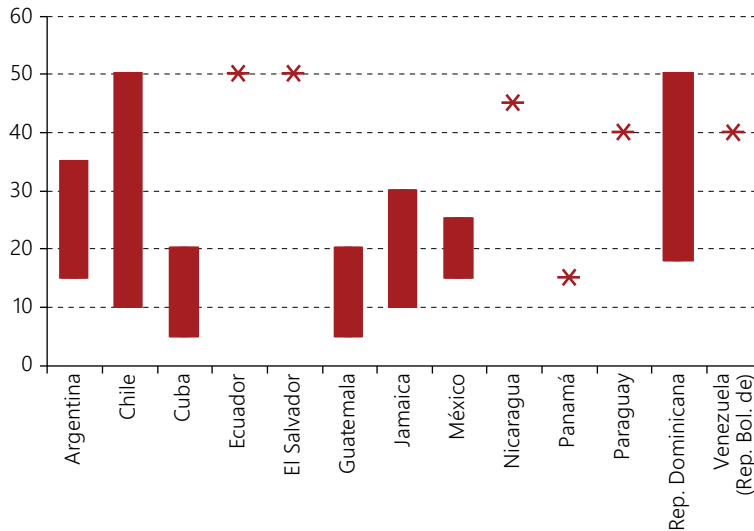
La norma de El Salvador es similar: no impone restricciones a la concentración de nutrientes en efluentes del tratamiento de aguas residuales domésticas, aunque sí los impone para el de aguas residuales industriales (aguas especiales), como por ejemplo purines. Para el vertido de ese tipo de efluentes, los valores límite son 50 mg/l de N y 15 mg/l de P (ver gráfico 10).

²⁶ En Perú, la norma establece que los límites máximos permisibles de N y P que puede contener el efluente dependen de la capacidad de dilución del cuerpo de agua receptor. Los cuerpos receptores son divididos en distintas categorías, y la dilución del efluente debe ser tal que se respeten los estándares de calidad de la categoría del cuerpo receptor. En la zona árida de la costa del Pacífico, donde los ríos tienen poco caudal durante los meses secos del año, la dilución es muy baja y por tanto serían necesarias remociones muy elevadas de nutrientes en las aguas residuales que son vertidas a esos ríos. No obstante, la remoción de nutrientes en esas zonas suele ser insuficiente para atender a la norma (Sunass, 2015).

²⁷ En el Estado Plurinacional de Bolivia, se exige que la descarga de agua residual, una vez diluida en el cuerpo de agua receptor, no altere los parámetros de calidad de este último. Estos parámetros oscilan, para el N, entre 12 mg/l (aguas de clases D, C, B) y 5 mg/l (aguas de clase A). Para el P, se considera el PO₄-P (ortofosfato), cuyos valores máximos permisibles oscilan entre 1 (clase D) y 0,4 mg/L (clase A).

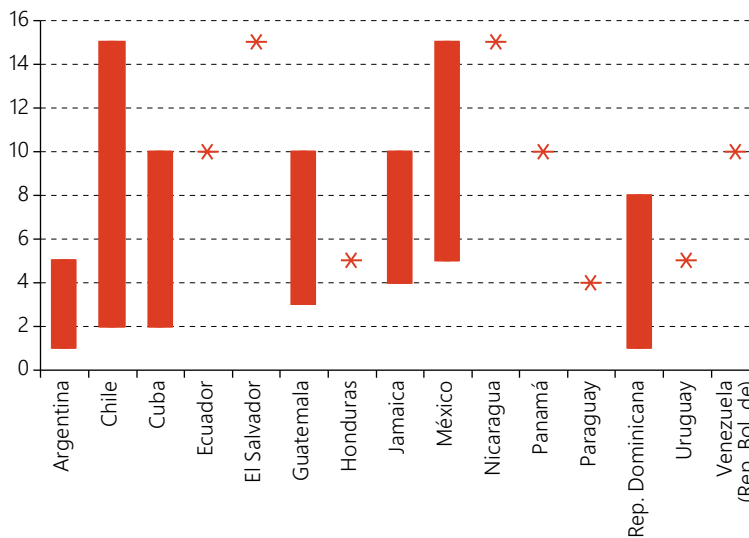
²⁸ En el caso de Brasil, la norma de vertido de efluentes indica valores máximos permisibles de algunos parámetros, como metales o pH, pero no de P. Tampoco especifica la concentración máxima de N (nitrógeno total) aunque sí especifica la de NH₄-N (nitrógeno amoniacal), que es 20 mg/l. La concentración máxima de nutrientes que podrá haber en el efluente dependerá del cuerpo de agua receptor. La norma brasileña divide los cuerpos de agua en diferentes tipos (dulce, salina, salobre) y, además, en cuatro clases según sus características y usos potenciales. El principio que se aplica es que la descarga del efluente no puede alterar la clasificación del cuerpo de agua donde está siendo vertido, que tiene parámetros de calidad definidos. La norma también da libertad para ajustar los valores máximos admisibles de N y P de los vertidos en casos específicos, en función de estudios técnicos que lo justifiquen. Para ambientes que presenten potencial de eutrofización elevado pueden ser establecidos valores muy rigurosos. En el caso de ambientes lénticos, como lagunas de agua parada, pueden llegar a exigirse límites de 1,27 mg/l en la concentración de N del efluente que se descarga.

Gráfico 9
Rango de valores máximos permisibles en las concentraciones de N de los efluentes descargados a cuerpos de agua receptores en países selectos de América Latina y el Caribe
(En mg/litro)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
Rango de valores máximos permisibles en las concentraciones de P de los efluentes descargados a cuerpos de agua receptores en países selectos de América Latina y el Caribe
(En mg/litro)



Fuente: Elaboración propia.

2. Marco normativo para la aplicación de biosólidos de PTAR en suelos agrícolas

En la mayoría de los países de ALC, la utilización de biosólidos u otros subproductos derivados de los lodos de PTAR se ve restringida por la presencia de metales pesados y microorganismos patógenos en su composición. Se han establecido valores máximos permisibles para ambos elementos. En cuanto al conjunto de metales que deben ser monitoreados, existen algunas discrepancias, pero todas las normativas contemplan límites para el arsénico, cadmio, cromo, plomo, mercurio y níquel.

En el caso de los patógenos, se suelen fijar límites para los coliformes fecales, salmonella y huevos de helminto. A continuación, se analizan las normativas sobre el aprovechamiento de productos fertilizantes provenientes de PTAR en seis países latinoamericanos. Esto sirve para ilustrar la variabilidad existente entre las regulaciones de los distintos países de la región, especialmente en lo que respecta al contenido máximo permisible de metales en lodos y biosólidos²⁹.

El cuadro 20 muestra los valores máximos permisibles de contenido de metales en los lodos, según las normas de algunos países de la región, y los compara con el rango de valores adoptado en los 27 países de la UE (CE, 2022).

Cuadro 20
Valores máximos permisibles para contenido de metales en lodos
(Mg/Kg base seca)

Uso posible para el lodo:	México		Panamá		Colombia		Perú
	Urbano con contacto directo (jardinería): clase A	Agrícola o mejora de suelo: clases B y C	Agrícola	Fabricación de abono	Agrícola: tipo A	Mejora de suelo: tipo B	Agrícola o mejora de suelo
Arsénico	41	75	40	75	20	40	40
Cadmio	39	85	40	85	8	40	40
Cromo	1 200	3 000	1 500	3 000	1 000	1 500	1 200
Cobre	1 500	4 300	1 500	4 300	1 000	1 750	1 500
Plomo	300	840	300	840	300	400	400
Mercurio	17	57	25	57	10	20	17
Níquel	420	420	420	420	80	420	400
Zinc	2 800	7 500	3 000	7 500	2 000	2 800	2 400
Molibdeno	-	-	25	75	18	75	-
Selenio	-	-	50	100	36	100	-

Uso posible para el lodo:	Ciudad de Buenos Aires (Argentina)	Chile		Brasil	Países de la Unión Europea
		Aplicación en suelos degradados	Aplicación en el resto de suelos	Agrícola o mejora de suelo	Uso agrícola
Arsénico	75	40	20	20	-
Cadmio	40	40	8	3	20-40
Cromo	1 500	-	-	2	80-1 500
Cobre	1 750	1 200	1 000	-	1 000-1 750
Plomo	1 200	400	300	150	750-1 200
Mercurio	25	20	10	1	16-25
Níquel	400	420	80	70	300-400
Zinc	4 000	2 800	2 000	-	2 500-4 000
Molibdeno	-	-	-	-	-
Selenio	-	100	50	80	-

Fuente: Elaboración propia.

²⁹ Los países considerados, en orden creciente de permisibilidad, son: El Salvador (país que todavía no impone límites de metales y patógenos), México, Panamá, Colombia, Perú, Chile y Brasil (país con la norma más exigente).

En El Salvador, la norma contempla el aprovechamiento de lodos, pero obliga sólo a su caracterización (reportar valores de metales y patógenos) sin establecer valores límite para su uso pretendido (MARN, 2019). Se observa que este país está en proceso de desarrollar una norma propia inspirada en la norma mexicana de uso de lodos (MARN, 2020).

En México, la norma divide los lodos en tres clases en función de su contenido de metales y patógenos y considera tres usos posibles según la clase (SEMARNAT, 2003). Sólo aquellos de menor contenido en metales y patógenos (menos de 1.000 NMP coliformes/g base seca) pueden ser aplicados en usos más exigentes, como jardines y paisajismo urbano. Para aplicaciones en usos forestales, mejoramiento de suelos, y usos agrícolas, los valores límite de metales y de patógenos son menos restrictivos (hasta 2.000.000 NMP coliformes /g base seca).

En Panamá, se distinguen dos usos potenciales para los lodos: fabricación de abonos y aplicación agrícola (DGNTI, 2000). Para ambos, se exige un límite de 2.000 UFC coliformes /g base seca. Los valores límite de metales son prácticamente idénticos a los de la norma mexicana, correspondiendo el nivel más exigente (menor contenido de metales) a la aplicación agrícola, mientras que para la fabricación de abonos se permite un mayor contenido de metales.

La norma de Perú se caracteriza por distinguir entre dos usos agrícolas para los lodos: aquellos que verifiquen un contenido de patógenos menor que 1.000 NMP coliformes/g base seca pueden ser destinados para aplicación directa en cultivos de alimento y forraje. Los que no, sólo pueden ser aptos para aplicación en suelos donde no haya riesgo de contacto con población y actividades ganaderas.

En Colombia, la norma exige, para cualquier fertilizante o abono orgánico, valores límites de metales similares a los de Panamá o Perú (ICONTEC, 2011). En 2004 fue promulgada la Norma Técnica Colombiana-NTC 5167 "Productos para la industria agrícola – productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo". Desde 2014, este país cuenta también con una norma específica para aprovechamiento de biosólidos (Minvivienda, 2014). El contenido máximo de patógenos es de 1.000 UFC enterobacterias (coliformes) /g base seca. Además, especifica valores máximos de otros contaminantes que pueden estar presentes en lodos de PTAR, como plásticos o vidrio.

Ese tipo de contaminantes también son especificados en la norma de Brasil. La norma brasileña para sustancias fertilizantes es particularmente rigurosa en el contenido de metales (MAPA, 2016), exigiendo menos de menos de 1.000 NMP coliformes/g base seca para fertilizantes orgánicos destinados para uso agrícola o para condicionamiento de suelo. Además de los límites de metales y patógenos, cualquier fertilizante orgánico o biofertilizante debe reunir una serie de especificaciones para ser comercializada como tal como, por ejemplo, atender a un contenido mínimo de nutrientes y de carbono orgánico (MAPA, 2020).

La norma de Chile que regula la aplicación de lodos de PTAR a suelos distingue entre lodos de clase A o clase B (MINSEGPRES, 2009). El contenido de coliformes debe ser inferior a 1.000 NMP coliformes/g base seca (lodos de clase A) y a 2.000.000 NMP coliformes/g base seca (lodos de clase B).

Además de las restricciones anteriormente anotadas, debe rescatarse que las normas de algunos países dan un paso más y complementan los criterios de contenido de metales en los lodos con criterios de acumulación de metales en el suelo. En Colombia (Minvivienda, 2014), Panamá (DGNTI, 2000), Perú (MINAM, 2017), y la Ciudad de Buenos Aires (Ciudad de Buenos Aires, 2018), es necesario respetar un límite de kilos de cada metal que puede acumularse en el suelo, por hectárea y año, como muestra el cuadro 21.

Cuadro 21
Tasa máxima anual permitida para aplicación de lodos en suelos

Metal	Colombia	Panamá	Ciudad de Buenos Aires (Argentina)	Perú	Países de la Unión Europea
	<i>(Kg/Hectárea/año)</i>				<i>(Mg/Kg/año)</i>
Arsénico	2,00	2,00	0,50	2,00	-
Cadmio	1,90	1,90	0,15	2,00	0,15
Cobre	75,00	75,00	12,00	100,00	12,00
Cromo	150,00	0,10	3,00	75,00	0-12,00
Mercurio	0,85	0,85	0,10	1,00	0,10
Níquel	21,00	21,00	3,00	20,00	3,00
Plomo	15,00	15,00	15,00	20,00	15,00
Selenio	5,00	5,00	-	-	-
Zinc	140,00	140,00	30,00	150,00	30,00

Fuente: Elaboración propia.

En Colombia y Chile se impone un límite a la carga total de metales que pueden acumularse por hectárea. En la Ciudad de Buenos Aires (Argentina), ese límite a la carga total de metales en el suelo debe ser respetado tanto en mg/kg de suelo como en kg/hectárea. El cuadro 22 muestra estos límites, comparándolos también con el rango de límites los de los 28 países miembros de la UE.

Cuadro 22
Cantidad máxima de metales acumulable en los suelos

Metal	Colombia <i>(Kg/hectárea)</i>	Chile			Ciudad de Buenos Aires (Argentina)		Países de la Unión Europea <i>(Mg/kg)</i>
		Macrozona Norte (suelos con pH >6,5) <i>(Mg/kg)</i>	Macrozona Norte (suelos con pH <6,5) <i>(Mg/kg)</i>	Macrozona Sur (pH>5) <i>(Mg/kg)</i>	Kg/hectárea	Mg/kg	
Arsénico	41	20	12,5	10	1,8	20	-
Cadmio	39	2	1,25	2	0,5	3	1-3
Cobre	1 500	150	100	75	40	150	50-140
Cromo	3 000	-	-	-	10	750	30-300
Mercurio	17	1,5	1	1	0,3	0,8	1-1,5
Níquel	420	112	50	30	10	150	30-75
Plomo	300	75	50	50	50	375	50-300
Selenio	36	4	3	4	-	-	-
Zinc	2 800	175	120	175	100	600	150-300

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, se observa un número creciente de países de ALC que cuentan con normas para regular el aprovechamiento de lodos de PTAR. La mayoría de esas normas establece el contenido máximo permisible de metales en lodos, y algunas categorizan a los lodos en función del contenido de metales y patógenos. Además, actualmente, la normativa de los países de ALC permite, e incluso estimula, el aprovechamiento agrícola de biosólidos. Sin embargo, en el futuro la región podría avanzar en normativas no tan favorables para ese uso debido a la progresiva acumulación de metales y de nitratos en suelos, lo que podría reducir las áreas aptas para recibir vertidos de biosólidos.

3. Marcos normativos para el uso de sales de fosfato precipitadas en PTAR como fertilizantes

En algunas regiones del mundo, la proliferación de áreas eutrofizadas o degradadas por metales y nitratos ha impulsado el establecimiento de normativas ambientales más rigurosas en relación con la aplicación de biosólidos en suelos. En este contexto, la Directiva Europea sobre nitratos establece que en áreas donde los suelos y las aguas subterráneas están contaminadas por nitratos, la cantidad máxima de N que puede ser añadida es de 170 kg por hectárea y año (CEE, 1991).

Además, la acumulación de metales y nitratos ha generado una creciente preocupación por otros contaminantes emergentes que también pueden estar presentes en los lodos, como microplásticos y residuos farmacéuticos (Corradini y otros, 2019; Mejías y otros, 2021). Como resultado, en regiones donde el uso agrícola de biosólidos ya es común, como en la UE, hay una tendencia a reducir dicho uso y, en cambio, aumentar la valorización energética del lodo seco mediante su incineración, proporcionando mayor seguridad para la eliminación de diversas sustancias contaminantes.

También se observa una tendencia creciente hacia la recuperación de nutrientes presentes en el lodo, ya sea mediante la precipitación de sales de N y P, como la estruvita, o incluso a través de la lixiviación de las cenizas de lodo incinerado (Vallet, 2017). En Europa, el Plan de Acción para una Economía Circular de 2015 y el nuevo marco normativo sobre fertilizantes han facilitado el reconocimiento de fertilizantes compuestos por nutrientes reciclados, ya sean orgánicos o derivados de residuos como la estruvita, el biochar o las cenizas (UE, 2019). En 2021, se aprobó una modificación de este marco normativo para incluir la estruvita y otras sales de fosfato precipitadas y sus derivados como materiales fertilizantes comercializables en la UE (UE, 2021). El informe asociado establece su valor agronómico y su falta de impactos adversos para el medio ambiente y la salud humana, permitiendo la comercialización de estas sales provenientes de aguas residuales y lodos municipales, así como de la industria alimentaria.

Las sales de fosfato precipitadas en PTAR son compuestos simples, homogéneos, de elevada pureza y sin presencia de metales u otros posibles contaminantes. Estos compuestos químicos actúan como fertilizantes inorgánicos, lo que facilita su proceso de registro. Además de Europa, en los Estados Unidos de América y Canadá, los gránulos de estruvita provenientes de PTAR están registrados como fertilizantes y se comercializan bajo diversas marcas, como Green Crystal de la empresa Ostara o BioStru de NuReSys.

En ALC, las sales de fosfato precipitadas en PTAR aún no se comercializan ni cuentan con registros en organismos competentes como SENASICA en México, DNSV en Panamá, SENASA en Argentina o MAPA en Brasil, por mencionar algunos ejemplos. Aunque el proceso de registro de estos productos fertilizantes en estos organismos normalmente incluye un análisis del producto, la simplicidad de su composición química y su naturaleza homogénea y pura, sugieren que este proceso no debería presentar problemas potenciales, a pesar de la falta de precedentes en la región.

B. Alternativas para la recuperación de nutrientes en plantas de tratamiento de aguas residuales

1. Recuperación de nutrientes mediante el aprovechamiento de biosólidos

Los lodos representan el principal subproducto derivado del proceso de tratamiento de aguas residuales. Comúnmente, estos lodos contienen cantidades significativas de nutrientes y materia orgánica, lo que los hace atractivos para su potencial aplicación en la agricultura o como mejoradores y acondicionadores del suelo. En términos específicos, los lodos aportan N, P y en menor medida, K. La fracción orgánica de los lodos tiene la capacidad de retener agua, actuando como una especie de esponja, lo que mejora la calidad de la capa de humus en los suelos tratados.

Para facilitar el transporte y manejo de los lodos hacia la disposición final, es crucial reducir su volumen, un proceso que implica disminuir la humedad hasta alcanzar niveles del 20-40%. Esto se logra mediante técnicas como la centrifugación, prensado y, posteriormente, el secado térmico o solar. El resultado de este proceso de estabilización se conoce como biosólido.

Sin embargo, el transporte de los biosólidos hasta sitios de disposición, como vertederos o rellenos sanitarios, constituye un componente costoso para las empresas de saneamiento, representando entre el 15% y el 50% de los costos totales (Wendland, 2005) del proceso total de tratamiento de las aguas residuales. Esta realidad ha impulsado iniciativas que permitan abaratar costos a la vez que se aprovechan los biosólidos.

En la región de ALC, a pesar de que una parte considerable de los biosólidos de las PTAR se destina a vertederos o monorellenos, el alto costo asociado con el transporte está llevando a las empresas de saneamiento a explorar opciones más rentables. Diversas opciones se presentan como alternativas para la disposición final de los lodos. El compostaje en instalaciones cercanas a las PTAR, donde se mezclan con otros residuos orgánicos, es una posibilidad. Aunque representa un costo mayor, el compostaje ofrece beneficios como la reducción de patógenos y la generación de un producto terroso con propiedades de manejo mejoradas. El compostaje de lodos también emerge como una alternativa incipiente en la región, evidenciada por casos como el de la empresa Iguá en Rio de Janeiro (Brasil).

También se destaca el uso directo en suelos agrícolas, con acuerdos con agricultores locales que reciben los biosólidos de manera gratuita. Ejemplos exitosos de esta práctica se encuentran en Monterrey, Puebla y Ciudad Juárez (México), así como en iniciativas más recientes como las de Aguas Andinas en Santiago (Chile) o GS Inima en Araçatuba (Brasil).

2. Recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita

A diferencia de la aplicación de biosólidos, la recuperación de nutrientes en PTAR mediante la precipitación de sales ofrece la ventaja de obtener nutrientes en forma de gránulos o pellets. Estos son fáciles de secar, envasar, almacenar y transportar, sin generar olores ni contener patógenos, y sin atraer vectores como moscas, entre otros. Además, la sal precipitada es una sustancia química pura, exenta de contaminantes como metales pesados o micro plásticos. Al ser un producto homogéneo y de composición conocida, los agricultores tienen un mejor control sobre el dosaje de nutrientes que añaden al suelo. Por la misma razón, se facilita su mezcla con otros componentes para obtener un producto fertilizante final con la composición de macro y micronutrientes deseada.

Además, en aquellas áreas donde existen normativas ambientales que limitan las cantidades de N y P que pueden verse en los suelos, la extracción previa de nutrientes del lodo resulta interesante, ya que reduce su contenido de N y P, ampliando las áreas donde puede ser vertido. Las sales de fosfato precipitadas en PTAR son compuestos simples, homogéneos, de elevada pureza y con ausencia de metales u otros potenciales contaminantes. Son compuestos químicos que actúan como fertilizantes inorgánicos.

Las principales sales que pueden ser precipitadas en la línea de lodos de una PTAR son la estruvita (fosfato de amonio y magnesio), la brushita (fosfato de calcio), y la vivianita (fosfato de hierro). De entre ellas, la producción de estruvita en reactores de precipitación controlada presenta mayor grado de madurez y está disponible a escala comercial, con algunos de estos reactores operando sin interrupción en PTAR desde hace más de 10 años.

La estruvita se precipita en la línea de lodos de una PTAR, a partir de corrientes ricas en amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$) y en fosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$). La precipitación de esta sustancia puede ocurrir de forma espontánea en el interior de las tuberías de la línea de lodos, causando incrustaciones indeseables, o de forma controlada dentro de un reactor. Para realizar una precipitación controlada se incrementa el pH de la corriente que se alimenta al reactor y se añade una fuente de iones magnesio (Mg^{2+}), la cual suele ser cloruro de magnesio (MgCl_2).

La estruvita tiene características muy positivas como fertilizante ya que aporta N, P y Mg, tiene un bajo índice salino, y además baja solubilidad en agua, con lo que realiza una liberación lenta de nutrientes. El cuadro 23 muestra sus características principales.

Cuadro 23
Características de la estruvita como fertilizante

Fórmula química	$NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$
Composición N-P-K	5-28-0 con 10% Mg
Nitrógeno	5%
Fosfato disponible	28%
Potasio	0%
Magnesio	10%
Solubilidad en agua	4%
Solubilidad en citrato	96%
Índice salino	7,7

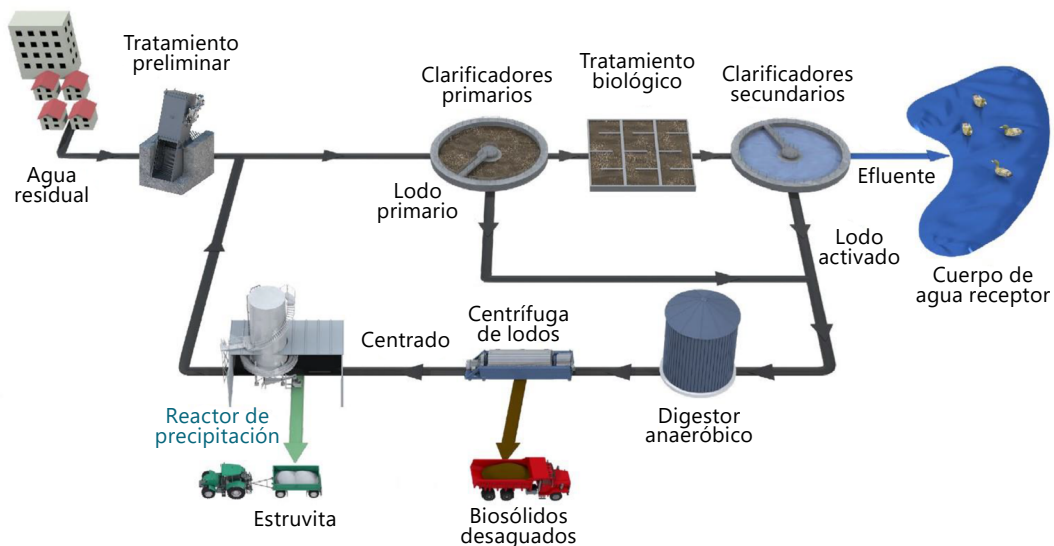
Fuente: Taurus, 2023.

Estas características facilitan el proceso de registro como fertilizante, hecho que ha generado que Además de Europa, en los Estados Unidos de América y en Canadá los gránulos de estruvita proveniente de PTAR también están registrados como fertilizantes y son comercializados bajo diversas marcas como, por ejemplo, Green Crystal de la empresa Ostara, o BioStru de NuReSys.

a) Requerimientos técnicos y operacionales de un sistema de precipitación de estruvita

La estruvita puede precipitarse de manera controlada en reactores utilizando dos corrientes distintas de la línea de lodos: el digestato y el centrado. Estos reactores pueden ser instalados tanto antes como después del proceso de desaguado de lodos. En la precipitación de estruvita antes del desaguado de lodos, el reactor se coloca en la línea de digestato, es decir, en los lodos digeridos que aún no han pasado por centrifugación o filtrado. En cambio, en la precipitación de estruvita después del desaguado de lodos, el reactor se ubica en la línea de centrado o filtrado de lodos ya digeridos que se recircula hacia la cabecera de la planta.

Diagrama 8
PTAR de lodos activados con un sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato



Fuente: Adaptado de Centrisys-CNP (2022a).

El principal beneficio de llevar a cabo la precipitación de estruvita en la línea de lodos de la planta radica en la eliminación significativa de N y P disueltos en la corriente líquida que se reintroduce en la cabecera de la planta, lo que conlleva a una drástica disminución en las concentraciones de N y P presentes en la descarga final hacia el cuerpo receptor. Los nutrientes precipitados pueden ser retirados en forma de pellets de estruvita pura o incorporados a los biosólidos producidos tras centrifugar el lodo. La recolección de estruvita implica la remoción de cristales grandes para su comercialización como fertilizante puro, mientras que el secuestro de estruvita deja los cristales dentro del lodo para mejorar sus propiedades fertilizantes.

La precipitación de estruvita es viable técnicamente en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales donde hay concentraciones adecuadas de $PO_4\text{-P}$ y $NH_4\text{-N}$ en las corrientes líquidas. Los reactores de estruvita son especialmente efectivos en plantas de lodos activados que realizan remoción biológica de P. La mayor viabilidad económica se logra en plantas que también realizan una etapa de precipitación química de P, lo que reduce el consumo de insumos químicos. Los reactores de estruvita también pueden instalarse en la salida de RAFA y en plantas de aeración prolongada. La solubilización de nutrientes en la fase líquida del lodo es clave para mejorar la remoción de nutrientes mediante sistemas de estruvita, especialmente en plantas que realizan digestión anaeróbica o hidrólisis térmica para solubilizar mayor cantidad de P.



Fuente: Adaptado de Centrisys-CNP (2022a).

b) Beneficios económicos y operacionales de instalar reactores de estruvita

Los beneficios económicos de un sistema de precipitación de estruvita se derivan de la venta de estruvita como fertilizante y de una serie de mejoras operacionales que se obtienen en la línea de lodos de la PTAR.

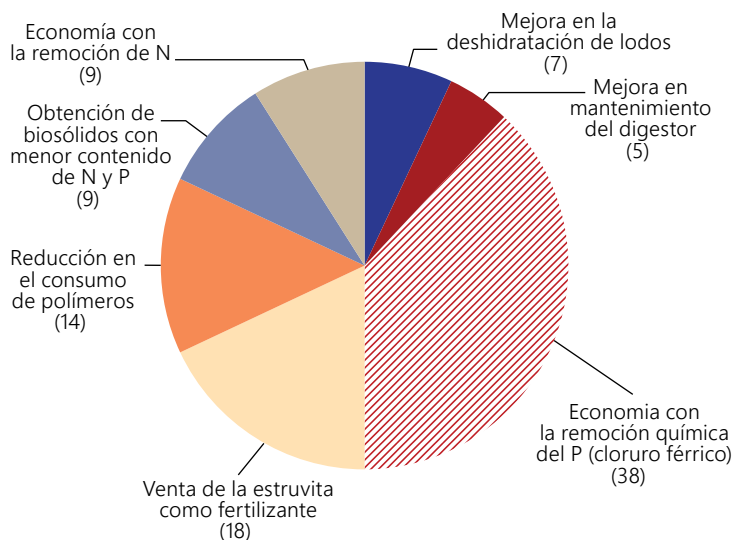
Estas mejoras operacionales suelen representar la mayor parte del beneficio económico total generado con la instalación de reactores de estruvita (alrededor del 90%). La venta de estruvita como fertilizante suele representar únicamente 10% del beneficio económico total en sistemas de digestato que recolecten esa sustancia (gráfico 11), y 18% en el caso de los sistemas de centrado (gráfico 12).

Gráfico 11
Desglose del beneficio económico originado por sistemas de precipitación de estruvita—reactores de digestato
 (En porcentajes)



Fuente: Forstner, 2015.

Gráfico 12
Desglose del beneficio económico originado por sistemas de precipitación de estruvita—reactores de centrado en PTAR con alrededor de 2.200 l/s de capacidad
 (En porcentajes)



Fuente: Lee, 2018b.

i) Recolección y venta de estruvita

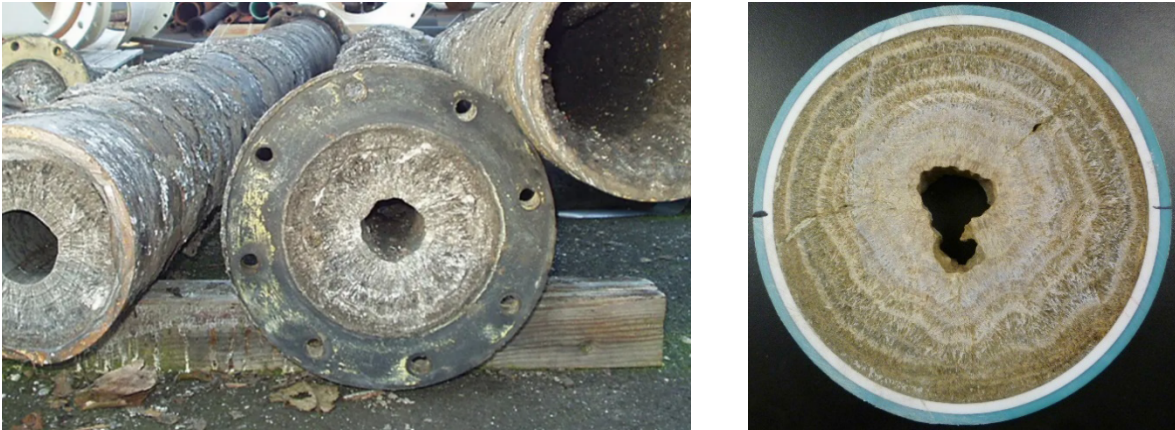
La estruvita es un fertilizante puro, de alta calidad y con liberación lenta de nutrientes. Su fórmula N-P-K es 5-28-0. Por ello, su precio podría aproximarse por el de la fórmula 16-20-0 (fertilizante comercial MAP), que en septiembre de 2023 era, en Centroamérica, de 0.70 USD/kg (MAG, 2023).

ii) Eliminación de las incrustaciones de estruvita en tuberías, válvulas y digestores

Las incrustaciones de estruvita reducen la capacidad de las tuberías. En casos extremos, pueden llegar a parar la línea de lodos. Para eliminar esta substancia es necesario usar remoción mecánica y química, lo que consume tiempo y recursos del equipo de manutención. Al precipitar de manera controlada la

estruvita dentro de un reactor, se minimiza la ocurrencia de este problema. Si se instala un reactor después de la deshidratación de lodos, se protegerá de incrustaciones la línea de centrado. Si se instala antes, se protegerá tanto la línea de centrado como la de digestato (las tuberías a la salida de los digestores). A continuación (imagen 1), se muestran ejemplos de tuberías que presentan este tipo de incrustaciones:

Imagen 1
Incrustaciones de estruvita en las paredes internas de tuberías



Fuente: Struvite Removal, 2023 y Envirotec, 2016.

La estruvita también puede formar incrustaciones en las paredes internas del digestor, reduciendo su volumen útil y complicando su mantenimiento. El siguiente gráfico corresponde al interior de un digestor, que ha sido vaciado para su limpieza periódica, y en el que se aprecia las incrustaciones de estruvita acumulada.

Imagen 2
Incrustaciones de estruvita dentro de un digestor anaeróbico, PTAR de Saskatoon (Canadá)



Fuente: Lee, 2018a.

Para minimizar las incrustaciones en el digestor, son particularmente interesantes dos sistemas: uno es el de pretratamiento de lodo WASSTRIP®, que remueve P de la corriente de lodo antes de la digestión, precipitándolo en forma de estruvita, y el otro el sistema de precipitación de brushita CalPrex®, que precipita esa sal fosfatada antes de la digestión.

iii) Mejora en la deshidratación del lodo digerido

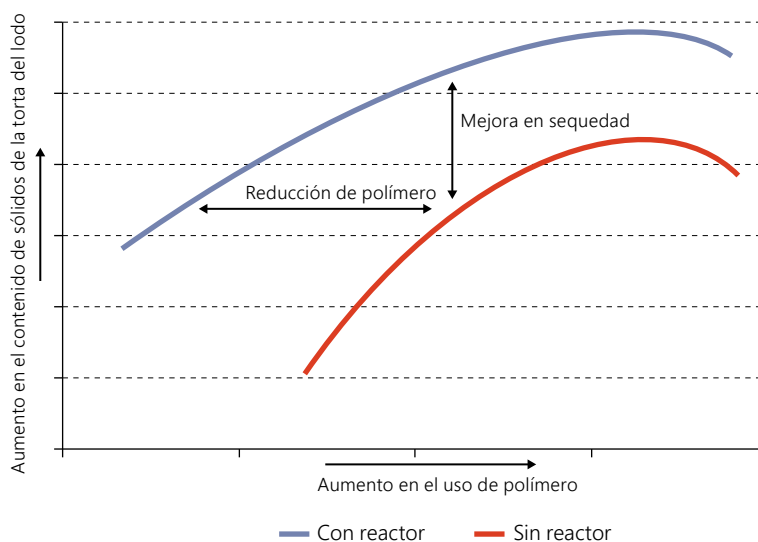
La presencia de P en la fase sólida del lodo le otorga una mayor cohesión. Al remover el P, se tiende a mejorar su deshidratación. El método más común para deshidratar lodo es mediante el uso de centrifugas, a las que se añade polímeros catiónicos como el PAM (Poliacrilamida) para ayudar en el espesamiento del lodo.

Al instalar ciertos sistemas de precipitación de estruvita, se obtiene una economía del 15% al 25% en la cantidad de polímero consumida en las centrifugas o, para la misma cantidad de polímero añadido, una reducción de hasta 2% del volumen de lodos deshidratados (García y Hardy, 2023). Además del beneficio económico, la reducción en el consumo de estos polímeros también es positiva desde el punto de vista ambiental, ya que hay estudios que indican que estas sustancias se acumulan en los biosólidos y, posteriormente, en el suelo donde estos biosólidos son depositados (Hennecke y otros, 2018).

Este beneficio operacional se hace evidente al instalar sistemas de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos), antes de la centrifugación de los lodos. Sin embargo, reactores de centrado que cuenten con pretratamiento de lodo (como el WASSTRIP®) también pueden conseguir esos beneficios (Lee, 2018a).

El gráfico 13 ilustra las curvas "sequedad vs. consumo de polímero" en los casos con y sin reactor de estruvita. Se observa que, al instalar el reactor, la curva se desplaza y se consigue un lodo más seco usando una menor cantidad de polímero.

Gráfico 13
Curvas de "sequedad de lodos vs. uso de polímero" en el proceso de deshidratación de lodos, con y sin reactor de estruvita instalado



Fuente: Centrisys-CNP, 2022b.

Un caso bastante ilustrativo sobre este tipo de mejora operacional es el de la PTAR Denver's Metro Wastewater Reclamation District en Denver, Colorado (EEUU). Esta PTAR tiene una capacidad de 9.639 l/s. Cuenta, desde 2020, con el mayor sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato del mundo. Después de la instalación del reactor de estruvita, se reportó una reducción en el consumo de polímero que es adicionado a las centrifugas para auxiliar con el desagüe del lodo. Este consumo bajó de un rango entre 16-25 kg por tonelada seca a un rango de 12-16 kg por tonelada seca, lo que supone una reducción del 25% en el consumo y un ahorro de costes de 500.000 USD/año (Centrisys-CNP, 2023).

iv) *Reducción en el consumo de insumos químicos (cloruro férrico o sulfato de aluminio) en PTAR que realicen precipitación química de P*

La precipitación de estruvita en la línea de lodos reduce la recirculación de nutrientes en la PTAR. Con ello, se reducen las concentraciones de N y P en el efluente final que se descarga al cuerpo receptor. En países con una normativa rígida de descarga de N y P, es muy común que las PTAR necesiten complementar la remoción biológica de nutrientes con otros métodos, de forma que se consigan atender los valores límite exigidos. Algunos de estos métodos son el ANNAMOX, los reactores biológicos de membrana, o la precipitación química de P con cloruro férrico o con sulfato de aluminio. Estos métodos de remoción de nutrientes suelen tener altos costes operacionales. Al instalar un sistema de precipitación de estruvita, se reduce la dependencia en estos métodos. En particular, se pueden obtener grandes ahorros cuando la PTAR utiliza sistemas de precipitación química de P, ya que cada tonelada de estruvita que se precipita evita el tener que añadir 930 kg de cloruro férrico, cuyo precio ronda los 2 USD/kg³⁰.

Uno de los casos más expresivos de economía con cloruro férrico ocurrió en la PTAR de Durham, Reino Unido, donde se consiguió una reducción del 50% en el consumo de este insumo (Lee, 2018a). La economía en el consumo de cloruro férrico se revela como un factor decisivo que puede definir la viabilidad económica de instalar un sistema de estruvita en una PTAR. En aquellos países donde la normativa de descarga de nutrientes ha evolucionado para valores límite muy rigurosos, la precipitación de estruvita se ha mostrado una estrategia efectiva y económicamente viable para ayudar a atender dicha normativa.

Por otro lado, por cada kg de P que es removido con cloruro férrico se producen 6,6 kg adicionales de lodo (Lee, 2018a). Eso quiere decir que, al precipitar estruvita en el reactor, además de reducir el consumo de cloruro férrico, se reduce la cantidad de lodo que tendrá que ser bombeado, digerido, desaguado, y finalmente transportado hacia el local de descarte final³¹.

v) *Economía con la remoción de N en la PTAR (sistemas de nitrificación-desnitrificación y sistemas ANNAMOX)*

En años recientes, está creciendo el uso de sistemas ANNAMOX para conseguir atender a valores cada vez más bajos de concentración de N en la descarga al cuerpo receptor. Consisten en un cultivo de bacterias que llevan a cabo la oxidación anaerobia de amonio, convirtiendo el nitrito (NO_2^-) y el amonio (NH_4^+) en gas nitrógeno (N_2).

Se ha considerado este sistema para la planta Madrid Sur, en España y para la PTAR La Farfana de Santiago, Chile, donde se instaló el sistema en 2020, para remover el 90% del N en la línea de centrado que se retorna a la cabecera de planta.

Los reactores de precipitación de estruvita que se instalan en la línea de centrado consiguen remover entre 9% y 15% del N de esa corriente. Por su parte, los reactores de digestato consiguen remover entre 14% y 17% del N en la corriente de digestato (Sánchez y Martins, 2021; Sánchez, 2020).

Ya que un reactor de precipitación de estruvita realiza una parte significativa del “trabajo” de un reactor ANNAMOX, éste puede funcionar a menor carga para conseguir atender a la remoción total de N estipulada en el proyecto. Al funcionar a menor carga, se reduce su consumo de energía eléctrica (bombas) y otros costes de operación, en el caso de que el reactor ANNAMOX ya esté instalado. Si se está proyectando un reactor nuevo, éste puede ser de menor volumen (menos CAPEX) en el caso de que la línea de lodos de la PTAR cuente con un reactor de estruvita.

En el caso de instalar reactores de estruvita en el centrado, la economía generada debido a una menor necesidad de remoción de N en el proceso de nitrificación-desnitrificación fue evaluada en 9% de la economía total (ver Gráfico 12). Esta economía se debió a un menor consumo de energía eléctrica con bombas y aireadores (Lee, 2018b).

³⁰ Con base en cotizaciones para Centroamérica y América del Sur, en agosto de 2023.

³¹ 1 tonelada de estruvita precipitada = 930 kg de cloruro férrico que son economizados = 834 kg de lodo que dejan de ser producidos.

La opción de instalar reactores de estruvita seguidos de reactores ANNAMOX es una alternativa al proceso de nitrificación que puede conseguir remociones muy altas de N. En una PTAR de Holanda (con capacidad para 160.000 habitantes) se consiguió, por esta opción, una remoción total de 90% del N en el efluente final (Schultz, 2009).

C) Metodología empleada en la estimación de nutrientes mediante la recuperación de estruvita en el tratamiento de aguas residuales

La metodología para analizar la viabilidad económica de instalar sistemas de precipitación de estruvita se enfoca en PTAR de lodos activados con remoción biológica de fósforo. Se sugiere seguir una serie de pasos estructurados:

- Análisis del proceso en la PTAR: Determinar si se realiza remoción biológica de fósforo, ya que la precipitación de estruvita es viable para concentraciones superiores a 50 mg/l de PO_4 -P.
- Obtención de datos operacionales de la planta: Recopilar información como caudales, contenido de sólidos en la línea de lodos, concentraciones de NH_4 -N y PO_4 -P, y masa de biosólidos producidos.
- Contacto con fabricantes de sistemas de estruvita: Consultar a empresas fabricantes para obtener cotizaciones y dimensionamiento de reactores adecuados al proceso de la PTAR.
- Cálculo de beneficios económicos: Estimar los beneficios anuales considerando precios locales de productos como cloruro férrico y estruvita, así como ahorros en costos de polímero catiónico y mantenimiento por incrustaciones.
- Cotización del sistema y cálculo de costos operacionales: Obtener cotizaciones de los fabricantes, considerando costos de capital y operacionales, incluyendo consumo de energía y químicos.
- Análisis de costo-beneficio: Contrastar beneficios anuales con costos operacionales para determinar el flujo de caja generado por el sistema de precipitación de estruvita.
- Análisis refinado y simulación: Realizar análisis más detallados del desempeño del sistema mediante simulaciones y, en caso necesario, pruebas piloto para reducir la incertidumbre en la estimación inicial.

Esta metodología es aplicable a PTAR de diversas escalas y características en ALC, considerando diferentes sistemas de precipitación de estruvita como se verá en la siguiente sección. Se proporcionan cuadros de referencia en el Anexo 2 para calcular beneficios económicos y costos de inversión y operativos para cada tipo de sistema en distintos tamaños de plantas.

C. Viabilidad de la implementación de sistemas de precipitación de estruvita en PTAR de Bogotá, Panamá y San Salvador

1. Caso Bogotá

Las configuraciones de los sistemas de tratamiento de la PTAR Salitre y de la futura PTAR Canoas, implican la existencia de viabilidad técnica para la recuperación de nutrientes mediante sistemas de precipitación de estruvita en dichas plantas.

La PTAR Salitre, desde la inauguración de su Fase II, cuenta con un proceso biológico de lodos activados con digestión anaeróbica; mientras la PTAR Canoas en su segunda fase de desarrollo, implementará un proceso biológico de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos. Además, la Fase III, se implementará un proceso de remoción biológica de N y P seguida de precipitación química de P. Ese proceso es el ideal para la instalación de sistemas de precipitación de estruvita. Además, ambas PTAR poseen espacio suficiente para albergar reactores de precipitación en su línea de lodos (ver cuadro 24).

Cuadro 24
Características generales de las PTAR Salitre y Canoas

Número	Nombre de la PTAR	Características
1	Salitre	<p>Lodos activados sin remoción biológica de nutrientes y con digestión anaeróbica de lodos. Deshidratación de lodos con centrifugas. Utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inauguración de la Fase I: 2000 • Inauguración de la Fase II: 2021 <p>Flujo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 345.600 m³/día o 4.000 l/s (Fase I) • 604.800 m³/día o 7.000 l/s (Fase II) • Población atendida: 2.850.200 P-eq
2	Canoas	<p>Lodos activados con remoción biológica de nutrientes, precipitación química de P, y digestión anaeróbica de lodos. Deshidratación de lodos con centrifugas. Utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Licitada en 2023. • Previsión Fase I: 2024 • Previsión Fase II: 2026 • Previsión Fase III: 2027 <p>Flujo: 1.382.400 m³/día o 16.000 l/s</p> <ul style="list-style-type: none"> • Población atendida: 7.322.000 P-eq

Fuente: Elaboración propia.

a) Viabilidad económica de la PTAR Salitre

La descarga del efluente final de la PTAR Salitre no está sometida a valores límites de N y P. Esta planta no necesita precipitar químicamente P. Instalar un sistema de precipitación de estruvita no generaría ganancia económica con el ahorro de productos químicos para precipitar P, como cloruro férrico o sulfato de aluminio.

Así, en la PTAR Salitre, las únicas ganancias económicas que se conseguirían al instalar una planta de estruvita, provendrían de los ingresos derivados de la venta de la estruvita como fertilizante, (en caso que se opte por recolectarla en vez de secuestrarla en el lodo); y los ingresos derivados de la eliminación de incrustaciones de estruvita en tuberías y válvulas, y de la mejora en la deshidratación de lodos.

Una planta de estruvita para la PTAR Salitre requeriría una inversión inicial de entre USD 5,5 y USD 10,4 millones³² dependiendo de si la precipitación de estruvita se presenta a partir de i) centrado; ii) digestato con recolección de la estruvita y 3) digestato con secuestro de la estruvita. Ese coste comprende la compra de equipamientos y la instalación de la planta, entregando la planta "llave en mano" al operador de la PTAR.

En los sistemas que precipitan estruvita a partir de centrado, los ingresos serían generados por la venta de la estruvita (36,3 toneladas/mes a un precio de 700 USD/tonelada) y por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías (beneficio estimado en 2.000 USD/mes debido a menores costes de mantenimiento).

En los sistemas que precipitan estruvita a partir de digestato, los ingresos también serían generados por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías, y además por la reducción de 15% en el consumo del polímero que se adiciona a las centrifugas durante la deshidratación de los lodos. Este último beneficio representaría una economía de 4.867 kg de polímero FA 4490 VHM por mes, con un precio de 4,92 USD/kg. Además, en este tipo de sistemas, se puede recolectar la estruvita (para ello se requieren reactores de mayor tamaño y, por tanto, de mayor coste) o se puede "secuestrar" la estruvita dentro del lodo, precipitándola en pequeños cristales que saldrán con los biosólidos. Un sistema alimentado con digestato que realizase recolección de estruvita en la PTAR Salitre produciría 41 toneladas/mes de esta substancia.

³² Con base en cotizaciones enviadas en octubre de 2023 por las empresas Ostara/Evoqua (sistema Pearl) y CNP/Centrisys (sistema MagPrex).

En cualquiera de los tres sistemas de precipitación de estruvita, los ingresos generados no serían suficientes para cubrir los costes de operación, como muestra el cuadro 25.

Cuadro 25
Planta de estruvita en la PTAR Salitre: costes de instalación y equipamiento (CAPEX),
costes de operación (OPEX), e ingresos generados bajo el marco normativo actual

	CAPEX (En dólares)	OPEX (En dólares por mes)	Ingresos (En dólares por mes)
Sistema de precipitación de estruvita a partir del centrado de lodos digeridos (realiza RECOLECCIÓN de la estruvita)	-20 000 000	-24 364	+27 085
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: RECOLECCIÓN de la estruvita	-5 437 500	-50 515	+25 944
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: SECUESTRO de la estruvita en el lodo	-10 350 000	-54 907	+54 711

Fuente: Elaboración propia con apoyo técnico de CNP/Centrisys y de Evoqua, 2023.

Como los costes de operación serían superiores a los ingresos, las plantas de estruvita nunca conseguirían recuperar la inversión inicial. En el caso de sistemas de centrado, los ingresos serían levemente superiores a los costes de operación, lo que tampoco justificaría la inversión. Se concluye que tanto la PTAR Salitre sería adecuada para recibir un sistema de precipitación de estruvita, pero tal sistema no sería rentable ya que la PTAR, en la actualidad, no está obligada a respetar niveles máximos en las concentraciones de N y P que descarga al Río Bogotá; y como se mencionó anteriormente, la principal fuente de beneficios de instalar sistemas de precipitación de estruvita corresponde a la reducción de costos de remoción de N y P.

En un escenario hipotético en el que se establezca un límite de 5 mg/l de Fósforo (P) para la descarga de la planta al Río Bogotá, la PTAR Salitre debería recurrir a la precipitación química utilizando cloruro férrico para controlar la concentración de P en su efluente.

Considerando una dosis de cloruro férrico de 26 mg/l³³, el consumo mensual de cloruro férrico en la PTAR Salitre alcanzaría las 350,4 toneladas. Los tres tipos de sistemas de precipitación de estruvita ofrecerían la posibilidad de alcanzar la concentración deseada de 5 mg/l de P en la descarga con un menor consumo de cloruro férrico. Se estima que la reducción en el consumo de este insumo sería del 10% según García y Hardy (2023).

Adicionalmente, se derivarían beneficios de la disminución de incrustaciones de estruvita en las tuberías y de la venta de estruvita en los sistemas de centrado y digestato con recolección. En los sistemas de digestato, se obtendrían beneficios adicionales mediante la reducción del 15% en el consumo de polímero en las centrifugas de lodo.

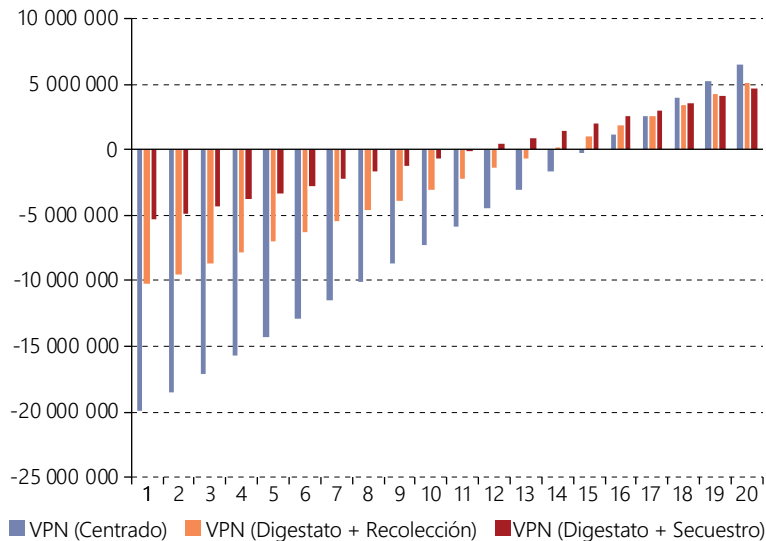
A continuación, se presenta el valor presente neto (VPN) acumulado para cada año del proyecto, desde su primer año (año 1) hasta su último año de funcionamiento (año 20), considerando los costos de inversión documentados en el Cuadro 25, según el tipo de proceso a implementar (ver gráfico 14).

Se resalta que la implementación de un sistema de precipitación de estruvita en la línea de centrado conllevaría un periodo de retorno de inversión (payback) de 16 años, presentando una tasa interna de retorno (TIR) del 7,17%. En contraste, un sistema de precipitación y recolección de estruvita en la línea de digestato mostraría un payback de 14 años y una TIR del 8,44%. Finalmente, la alternativa de introducir un sistema de precipitación y secuestro de estruvita en la línea de digestato presentaría un payback de 12 años, acompañado de una TIR del 11,26%.

³³ Sería la misma que en el proyecto de la PTAR Canoas.

Gráfico 14

Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Salitre



Fuente: Elaboración propia.

b) Viabilidad económica de la PTAR Canoas

El proyecto de la PTAR Canoas establece que, en su Fase III, se realizará la precipitación química de P para conseguir una descarga que no supere un límite de 5 mg/l de P. Para ello serán consumidas 1.000,78 toneladas por mes de cloruro férrico (CDM Smith & INGESAM, 2014).

Mediante sistemas de precipitación de estruvita, esta PTAR podría conseguir una descarga de 5 mg/l de P usando 10% menos de cloruro férrico. Esa economía sería generada tanto por sistemas de centrado como de digestato. La reducción en el consumo de cloruro férrico sería el mayor beneficio económico de instalar un sistema de precipitación de estruvita, ya que generaría una economía de 220.000 USD/mes.

Además, los sistemas de digestato mejorarían la deshidratación de los lodos y con ello se generaría una economía de 15% en el consumo de polímero. Se estima que el consumo total de polímero en las centrifugas de la PTAR Canoas sea de 90,3 toneladas por mes (CDM Smith & INGESAM, 2014). La economía de polímero representaría un beneficio adicional de 66.600 USD/mes.

El tercer beneficio económico significativo se originaría con la venta de la estruvita precipitada. En un sistema de centrado, se producirían 125 toneladas/mes, valoradas en 86.130 USD por mes. En un sistema de digestato con recolección, se producirían 95 toneladas/mes (65.750 USD/mes).

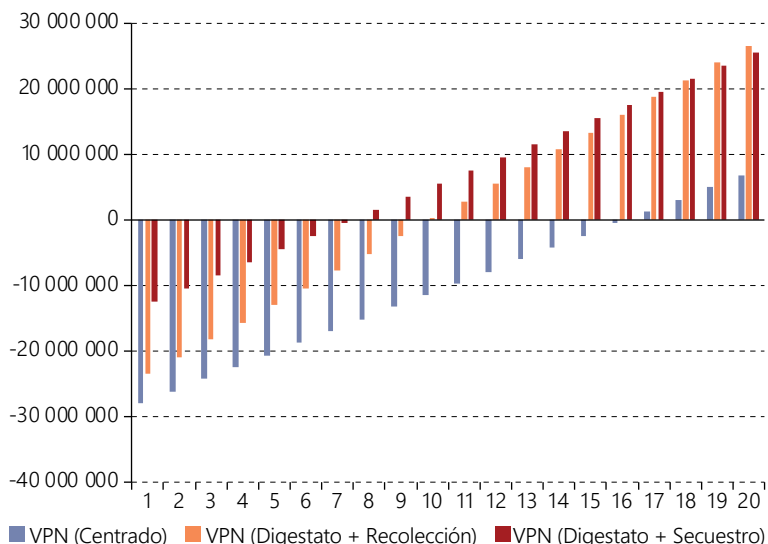
La construcción de la planta de estruvita supondría un desembolso inicial (CAPEX) de:

- 28.000.000 USD para un sistema en la línea de centrado.
- 23.657.140 USD para un sistema en la línea de digestato, con recolección de la estruvita precipitada.
- 12.428.570 USD para un sistema en la línea de digestato, con secuestro de la estruvita en el lodo.

El VPN acumulado para cada año del proyecto, según el tipo de proceso a implementar, se presenta a continuación (ver gráfico 15).

Gráfico 15

Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Canoas



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior, se aprecia que un sistema de precipitación de estruvita en la línea de centrado mostraría un payback de 17 años, respaldado por una TIR del 6,33%. De manera similar, se observa que un sistema de precipitación y recolección de estruvita en la línea de digestato presentaría un payback de 10 años, respaldado por una TIR del 13,34%. Además, se destaca que un sistema de precipitación y secuestro de estruvita en la línea de digestato exhibiría un payback de 8 años, acompañado de una TIR del 19,53%.

c) Resumen de viabilidad económica en las PTAR Salitre y Canoas

El cuadro 26 muestra las características del sistema de precipitación de estruvita que ofreció mejor beneficio-costo en cada una de las situaciones consideradas: PTAR Salitre bajo la normativa actual (sin límite de P en la descarga), PTAR Salitre bajo una nueva normativa con límite de 5 mg/l de P en la descarga, y futura PTAR Canoas.

Cuadro 26
Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costo para las PTAR Salitre y Canoas en Bogotá

	PTAR El Salitre (situación actual)	PTAR El Salitre (con límite de P en la descarga)	Futura PTAR Canoas (Fase III)
Límite de P en la descarga	ninguno	5 mg/l	5 mg/l
Consumo de FeCl ₃ para precipitar P	0	350,4 toneladas/mes	1.000,8 toneladas/mes
Mejor alternativa para precipitar estruvita	Reactores alimentados con centrado	Reactores alimentados con digestato y secuestro de la estruvita en el lodo	Reactores alimentados con digestato y secuestro de la estruvita en el lodo
Dimensionamiento de la mejor alternativa	1 reactor Pearl Fx-12	8 reactores MagPrex 8x50'	16 reactores MagPrex 8x50'
CAPEX de la mejor alternativa	20 000 000 USD (20 millones de dólares)	5 437 500 USD (5,4 millones de dólares)	12 428 570 USD (12,4 millones de dólares)
Payback de la mejor alternativa	no es rentable	12 años	8 años
TIR de la mejor alternativa	no es rentable	11,26%	19,53%

Fuente: Elaboración propia.

2. Caso Panamá

La recuperación de nutrientes mediante sistemas de precipitación de estruvita es viable técnicamente en la PTAR Juan Díaz, que atiende a los distritos de Panamá y San Miguelito, y también en las dos PTAR proyectadas para los distritos de Arraiján y La Chorrera, en la provincia de Panamá Oeste (PSP, 2016).

Todas estas PTAR son de lodos activados y con digestión anaeróbica. La de Juan Díaz, además, realiza hidrólisis térmica antes de la digestión, lo que es benéfico para la recuperación de nutrientes. Ninguna de estas plantas ha sido proyectada para realizar remoción biológica o química de P, ya que no es necesario para atender a la norma actual de descarga (ver cuadro 27).

Cuadro 27
Características generales de las PTAR Juan Díaz, Arraiján Este y Caimito

Número	Nombre de la PTAR	Características
1	Juan Díaz	<p>Lodos activados con remoción biológica de nutrientes y digestión anaeróbica (con hidrólisis previa). Utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inauguración de la etapa I: 2013 • Inauguración de la etapa II: 2022 <p>Flujo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 348.921 m³/día o 4.038 l/s (en 2023) • 475.000 m³/día o 5.500 l/s (capacidad máxima) <p>Población atendida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1.200.000 P-eq (en 2023)
2	Arraiján Este	<p>Lodos activados con digestión anaeróbica, con utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Licitada en mayo de 2022 <p>Flujo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 53.568 m³/día o 620 l/s (en 2025) • 86.400 m³/día o 1.000 l/s (etapa II – en 2050) <p>Población atendida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 112.748 P-eq (en 2025) • 183.088 P-eq (en 2050)
3	Caimito (La Chorrera)	<p>Lodos activados con digestión anaeróbica, con utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración</p> <ul style="list-style-type: none"> • Licitada en enero de 2023 <p>Flujo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 116.640 m³/día o 1.350 l/s (etapa única) <p>Población atendida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 189.499 P-eq (en 2025) • 340.745 P-eq (en 2050)

Fuente: Elaboración propia.

a) Viabilidad económica en la PTAR de Juan Díaz con normativa actual

Como se anotó anteriormente, la regulación sobre concentración de N y P es bastante laxa en Panamá, motivo por el cual las PTAR no necesitan realizar precipitación química de P, para cumplir con los estándares normativos.

Así las cosas, la instalación de un sistema de precipitación de estruvita en la PTAR Juan Díaz no generaría beneficios económicos derivados del ahorro de productos químicos para precipitar P, como cloruro férrico o sulfato de aluminio.

Una planta de estruvita para la PTAR Juan Díaz requeriría una inversión inicial de entre USD 1,8 y 20 millones³⁴ dependiendo de si la precipitación de estruvita se presenta a partir de 1) centrado; 2) digestato con recolección de la estruvita y 3) digestato con secuestro de la estruvita. Ese coste comprende la compra de equipamientos y la instalación de la planta, entregando la planta "llave en mano" al operador de la PTAR.

En los sistemas que precipitan estruvita a partir de centrado, los ingresos serían generados por la venta de la estruvita (35,8 toneladas/mes a un precio de 700 USD/tonelada) y por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías (beneficio estimado en 2.000 USD/mes debido a menores costes con mantenimiento).

En los sistemas que precipitan estruvita a partir de digestato, los ingresos también serían generados por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías, y además por la reducción de 15% en el consumo del polímero (polielectrolito PAM) que se adiciona a las centrifugas durante la deshidratación de los lodos. Este último beneficio representaría una economía de 1.361 kg de polímero por mes, con un precio de 4.90 USD/kg. Además, en este tipo de sistemas, se puede recolectar la estruvita (para ello se requieren reactores de mayor tamaño y, por tanto, de mayor coste) o se puede "secuestrar" la estruvita dentro del lodo, precipitándola en pequeños cristales que saldrán con los biosólidos. Un sistema alimentado con digestato que realizase recolección de estruvita en la PTAR Juan Díaz produciría casi 7 toneladas/mes de esta sustancia.

En cualquiera de los tres sistemas de precipitación de estruvita, los ingresos generados no serían suficientes para cubrir los costes de operación, como muestra el cuadro 28.

Cuadro 28
Planta de estruvita en la PTAR Juan Díaz: costes de instalación y equipamiento (CAPEX),
costes de operación (OPEX) e ingresos generados bajo el marco normativo actual

	CAPEX (En dólares)	OPEX (En dólares por mes)	Ingresos (En dólares por mes)
Sistema de precipitación de estruvita a partir del centrado de lodos digeridos (realiza recolección de la estruvita)	-20 000 000	-26 343	+27 020
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: recolección de la estruvita	-3 750 000	-12 020	+13 271
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: secuestro de la estruvita en el lodo	-1 800 000	-10 213	+8 668

Fuente: Elaboración propia con apoyo técnico de CNP/Centrisys y de Evoqua, 2023.

En el caso de sistemas de centrado y de digestato con recolección de estruvita, los ingresos serían levemente superiores a los costes de operación, pero no lo suficiente para justificar la inversión. En el caso de sistemas de digestato con secuestro de la estruvita en el lodo, los costes de operación serían superiores a los ingresos y la planta de estruvita nunca conseguiría recuperar la inversión inicial. Se concluye así que tanto la PTAR de Juan Díaz como las dos PTAR de lodos activados que están siendo proyectadas en Arraiján Este y La Chorrera serían adecuadas para recibir un sistema de precipitación de estruvita, pero tal sistema no sería rentable con el marco normativo actual.

b) Viabilidad económica en la PTAR de Juan Díaz: con normativa exigiendo 4 mg/l de P

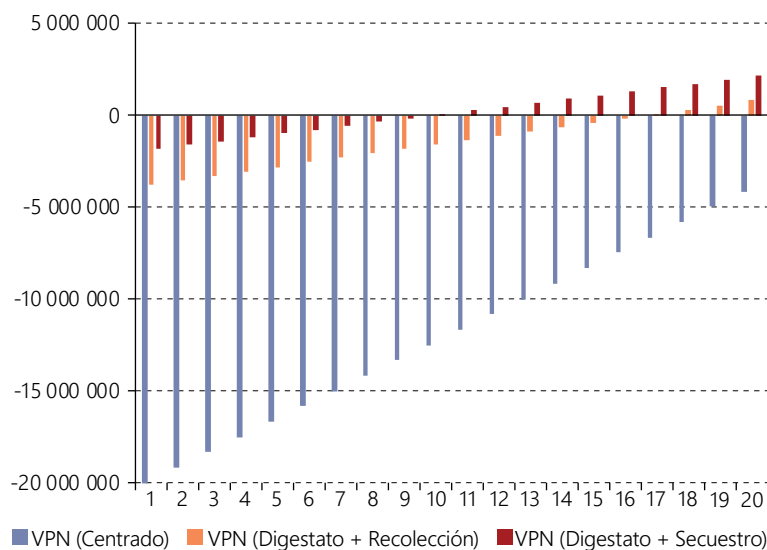
En un escenario hipotético en el que se establezca un límite de 4 mg/l de Fósforo (P) para la descarga de la planta, la PTAR Juan Díaz debería recurrir la precipitación química para conseguir controlar la concentración de P en su efluente.

³⁴ Con base en cotizaciones enviadas en octubre de 2023 por las empresas Ostara/Evoqua (sistema Pearl) y CNP/Centrisys (sistema MagPrex).

Para evaluar la viabilidad económica de implementar una planta de precipitación de estruvita en la PTAR Juan Díaz, se parte del supuesto de que dicha PTAR opera mediante el siguiente proceso: lodos activados con remoción biológica de P, seguida de precipitación química de P utilizando cloruro férrico y finalmente, digestión anaeróbica de lodos con hidrólisis térmica previa.

A continuación, se presenta el VPN acumulado para cada año del proyecto. Este análisis tiene en cuenta los costos de inversión detallados en el cuadro 28, así como los beneficios económicos derivados del ahorro en productos químicos para la precipitación de fósforo, tales como cloruro férrico o sulfato de aluminio; y los demás beneficios económicos (ver gráfico 16).

Gráfico 16
Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR Juan Díaz



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior, se aprecia que la implementación de un sistema de precipitación de estruvita en la línea de centrado resultaría en un período de retorno de inversión de 25 años, superando la vida útil proyectada para el proyecto, la cual es de 20 años. En un horizonte temporal de 20 años, la TIR sería del 1,70%.

Asimismo, se observa que la introducción de un sistema de precipitación y recolección de estruvita en la línea de digestato reduciría el período de retorno de inversión a 17 años, con una TIR del 6,12%. Por último, la implementación de un sistema de precipitación y secuestro de estruvita en la línea de digestato mostraría un payback de 10 años, con una TIR significativamente más alta del 13,68%.

c) Resumen de viabilidad económica en la PTAR Juan Díaz

El cuadro 29 muestra las características del sistema de precipitación de estruvita que ofreció mejor relación beneficio-costos en cada una de las dos situaciones consideradas para la PTAR: bajo la normativa actual (límite de 10 mg/l de P en la descarga) y bajo una nueva normativa con límite de 4 mg/l de P. La consideración de un endurecimiento futuro en las normativas resalta la necesidad potencial de que las PTAR en Panamá adopten soluciones innovadoras que no solo cumplan con los estándares ambientales, sino que también sean económicamente viables.

Cuadro 29
Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costo para la PTAR Juan Díaz

	PTAR Juan Díaz (Situación actual)	PTAR Juan Díaz (Con límite de 4 mg/l P en la descarga)
Límite de P en la descarga	10 mg/l	4 mg/l
Consumo de FeCl ₃ para precipitar P	0	98 toneladas/mes
Mejor alternativa para precipitar estruvita	Reactores alimentados con digestato y recolección de la estruvita en el lodo	Reactores alimentados con digestato y secuestro de la estruvita en el lodo
Dimensionamiento de la mejor alternativa	2 reactores MagPrex 2x40'	1 reactor MagPrex 1x40'
CAPEX de la mejor alternativa	3 750 000 USD (3,75 millones de dólares)	1 800 000 USD (1,8 millones de dólares)
Payback de la mejor alternativa	No es rentable	10 años
TIR de la mejor alternativa	No es rentable	13,68%

Fuente: Elaboración propia.

3. Caso San Salvador

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de precipitación de estruvita encuentran su aplicación óptima en PTAR que emplean lodos activados con digestión anaeróbica y llevan a cabo tanto la remoción biológica como química de P. Por lo tanto, la recuperación de nutrientes mediante este tipo de sistemas no resulta técnicamente viable en las 21 PTAR existentes administradas por la ANDA. Además, la instalación de estos sistemas de precipitación de estruvita no sería práctica en las PTAR gestionadas por los municipios, debido a su reducido tamaño y a la falta de procesos de lodos activados con remoción biológica del fósforo.

Sin embargo, los sistemas de precipitación de estruvita sí que tendrían aplicación en un conjunto de tres nuevas PTAR que están siendo proyectadas en El Salvador. Estas PTAR, de gran porte, contemplan la centrifugación y el secado solar de lodos y el aprovechamiento de los biosólidos resultantes como substancias fertilizantes que serían usados por los agricultores locales. En conjunto, estas tres plantas brindarían saneamiento a una población 2.900.000 personas equivalentes y producirían anualmente 46.000 toneladas de biosólido (Biwater, 2016) (ver cuadro 30).

Cuadro 30
Características generales de las 3 nuevas PTAR proyectadas en El Salvador

Número	Nombre de la PTAR	Características
1	San Salvador (Aguilares)	Lodos activados con digestión anaeróbica, filtración terciaria y desinfección del efluente, tratamiento y secado solar de lodos con la utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración. <ul style="list-style-type: none"> • Flujo (época seca): 439.296 m³/día o 5.084 l/s • Flujo (total a tratar): 702.874 m³/día o 8.135 l/s • Carga de DBO: 136.652 kg/día • 2.277.540 P-eq
2	Santa Ana	Lodos activados con digestión anaeróbica, filtración terciaria y desinfección del efluente, tratamiento y secado solar de lodos con la utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración. <ul style="list-style-type: none"> • Flujo (época seca): 59.324 m³/día o 687 l/s • Flujo (total a tratar): 94.918 m³/día o 1.098 l/s • Carga de DBO: 22.818 kg/día • 380.301 P-eq

Número	Nombre de la PTAR	Características
3	San Miguel	<p>Lodos activados con digestión anaeróbica, filtración terciaria y desinfección del efluente, tratamiento y secado solar de lodos con la utilización de biogás por medio de una planta de cogeneración.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flujo (época seca): 33.770 m³/día o 391 l/s • Flujo (total a tratar): 74.295 m³/día o 860 l/s • Carga de DBO: 15.062 kg/día • 242.159 P-eq

Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes apartados, se hará énfasis en la PTAR de Aguilares, en San Salvador, para analizar la viabilidad económica de sistemas de estruvita, tanto bajo la normativa actual como bajo una hipotética nueva normativa que establezca un valor límite de 5 mg/l de P en la descarga al cuerpo receptor.

a) Viabilidad económica en la PTAR de Aguilares con normativa actual

En El Salvador, con la normativa actual, las PTAR no necesitan precipitación química de P ni ningún otro método avanzado de remoción de nutrientes. Por lo tanto, un sistema de precipitación de estruvita no generaría ganancia económica con el ahorro de productos químicos para precipitar P, como cloruro férrico o sulfato de aluminio.

En ese orden de ideas, los beneficios en un sistema que precipita estruvita a partir de centrado, los ingresos serían generados por la venta de la estruvita (123 toneladas/mes a un precio de 700 USD/tonelada) y por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías (beneficio estimado en 2.000 USD/mes debido a menores costes con mantenimiento).

En caso de sistemas que precipitan estruvita a partir de digestato, los ingresos también serían generados por la reducción de las incrustaciones de estruvita en las tuberías, y además por la reducción de 15% en el consumo del polímero (polielectrolito PAM) que se adiciona a las centrifugas durante la deshidratación de los lodos. Este último beneficio representaría una economía de 832 kg de polímero por mes, con un precio de 4,90 USD/kg.

Además, en este tipo de sistemas, se puede recolectar la estruvita (para ello se requieren reactores de mayor tamaño y, por tanto, de mayor coste) o se puede "secuestrar" la estruvita dentro del lodo, precipitándola en pequeños cristales que saldrán con los biosólidos. Un sistema alimentado con digestato que realizase recolección de estruvita en la PTAR de San Salvador produciría 41.1 toneladas/mes de esta sustancia.

Se estima que una planta de estruvita para la PTAR San Salvador requeriría una inversión inicial entre USD 5,1 y USD 20 millones³⁵ dependiendo de si la precipitación de estruvita se presenta a partir de i) centrado; ii) digestato con recolección de la estruvita y 3) digestato con secuestro de la estruvita.

En cualquiera de los tres sistemas de precipitación de estruvita, los ingresos generados no serían suficientes para cubrir los costes de operación, como muestra el cuadro 31.

Cuadro 31
Planta de estruvita en la PTAR proyectada para San Salvador, en Aguilares: costes de instalación y equipamiento (CAPEX), costes de operación (OPEX) e ingresos generados bajo el marco normativo actual

	CAPEX (En dólares)	OPEX (En dólares por mes)	Ingresos (En dólares por mes)
Sistema de precipitación de estruvita a partir del centrado de lodos digeridos (realiza recolección de la estruvita)	-20 000 000	- 98 286	+88 129

³⁵ Con base en cotizaciones enviadas en octubre de 2023 por las empresas Ostara/Evoqua (sistema Pearl) y CNP/Centrisys (sistema MagPrex).

	CAPEX (En dólares)	OPEX (En dólares por mes)	Ingresos (En dólares por mes)
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: recolección de la estruvita	-9 772 618	-55 490	+34 859
Sistema de precipitación de estruvita a partir de digestato (lodos digeridos sin centrifugar) Opción: secuestro de la estruvita en el lodo	-5 134 165	-50 911	+6 091

Fuente: Elaboración propia con apoyo técnico de CNP/Centrisys y de Evoqua, 2023.

Como los costes de operación serían superiores a los ingresos, la planta de estruvita, bajo ninguna de las alternativas expuestas conseguiría recuperar la inversión inicial. Se concluye que la PTAR de lodos activados que está siendo proyectada en San Salvador sería adecuada para recibir un sistema de precipitación de estruvita, bajo el marco normativo que regula el vertido de N y P a las fuentes de agua.

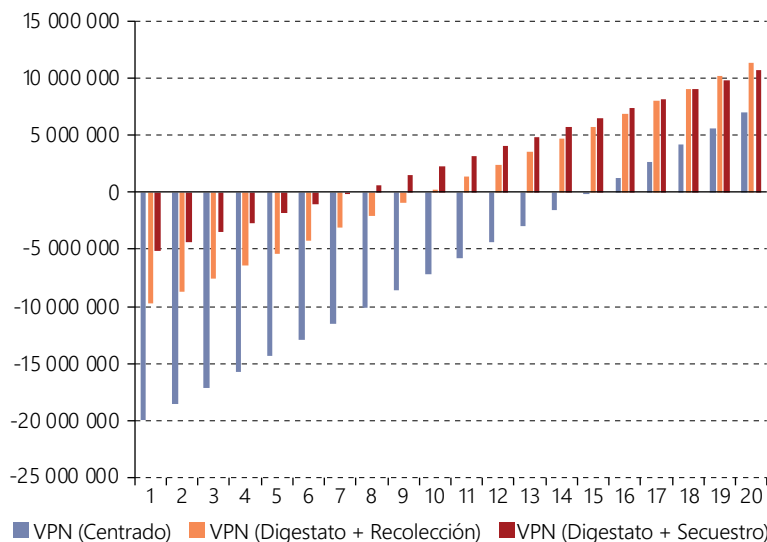
b) Viabilidad económica en la PTAR de Aguilares con normativa que imponga un máximo de 5 mg/l de P

En un escenario hipotético en el que Reglamento Técnico Salvadoreño establezca un límite de 5 mg/l de Fósforo (P) para la descarga de las PTAR; la planta proyectada para San Salvador debería recurrir a la precipitación química utilizando cloruro férrico para controlar la concentración de P en su efluente.

En tal escenario, la PTAR proyectada para San Salvador debería acudir a la precipitación química para conseguir controlar la concentración de P en su efluente. En esta sección se analiza la viabilidad económica de instalar una planta de precipitación de estruvita en esa PTAR, suponiendo que la misma operase con el siguiente proceso: lodos activados con remoción biológica de P, seguida de precipitación química de P (usando cloruro férrico) y digestión anaeróbica de lodos.

En el gráfico 17 (que contempla los costos de inversión documentados en el cuadro 31) se observa que un sistema de precipitación de estruvita en la línea de centrado mostraría un periodo de retorno de la inversión de 16 años y una TIR del 7,32%. Un sistema de precipitación y recolección de estruvita en la línea de digestato exhibiría un periodo de retorno de la inversión de 10 años, con una TIR del 13,61%. Finalmente, un sistema de precipitación y secuestro de estruvita en la línea de digestato presentaría un payback de 8 años y una TIR del 19,67%.

Gráfico 17
Valor Presente Neto acumulado según el tipo de sistema de precipitación de estruvita a instalar en la PTAR proyectada para San Salvador



Fuente: Elaboración propia.

C) Resumen de viabilidad la PTAR Aguilares

El cuadro 32 muestra las características del sistema de precipitación de estruvita que ofreció mejor costo-beneficio en cada una de las dos situaciones consideradas para la PTAR: bajo la normativa actual (límite de 15 mg/l de P en la descarga) y bajo una nueva normativa con límite de 5 mg/l de P.

Cuadro 32
Resumen de alternativas con el mejor beneficio-costo para la PTAR de Aguilares (San Salvador)

	Con límite P actual 15 mg/l	Con límite de P 5 mg/l
Límite de P en la descarga	15 mg/l	5 mg/l
Consumo de FeCl ₃ para precipitar P	0	457 toneladas/mes
Mejor alternativa para precipitar estruvita	Reactores alimentados con digestato y recolección de la estruvita en el lodo	Reactores alimentados con digestato y secuestro de la estruvita en el lodo
Dimensionamiento de la mejor alternativa	2 reactores MagPrex 2x40'	1 reactor MagPrex 1x40'
CAPEX de la mejor alternativa	9 772 618 USD (9,77 millones de dólares)	5 134 165 USD (5,1 millones de dólares)
Payback de la mejor alternativa	No es rentable	8 años
TIR de la mejor alternativa	No es rentable	19,67%

Fuente: Elaboración propia.

IV. Mecanismos para el financiamiento de proyectos de economía circular en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe

Son numerosos los documentos (Brichetti, y otros, 2021; Lentini, 2022; Saravia Matus y otros, 2023a) que advierten que los países de ALC no lograrán los ODS 6, es decir la cobertura universal segura de los servicios de agua y saneamiento.

Las causas que impedirán el logro de esos objetivos son múltiples, yendo desde limitada capacidad técnica y de gestión de los prestadores, el bajo tamaño de muchos de ellos —que les impide el logro de economías de escala—, la falta de políticas de promoción; las bajas tarifas aplicadas, los limitados ingresos de la población a servir, entre muchos otros.

Sin embargo, entre todos ellos, se destaca los limitados montos de recursos presupuestales que se están dedicando al sector de agua y saneamiento por los gobiernos de la región, respecto a los montos que en diferentes estudios se ha considerado necesarios para realizar las inversiones en infraestructura.

De acuerdo con los cálculos realizados en forma independiente por el BID (Brichetti y otros, 2021)³⁶, la CAF (Lentini, 2022) y la CEPAL³⁷ (Saravia Matus y otros, 2023a), las inversiones anuales necesarias en ampliación y renovación de la infraestructura de agua y saneamiento para lograr las metas del ODS 6 en ALC están entre USD 373.890 millones y USD 698.000 millones (entre 0,5% y 1,38% del PIB regional), mientras que los niveles de inversión realizados entre 2015-2019 apenas ha alcanzado alrededor del 0,16% del PIB regional (Lentini, 2022).

Cuando el análisis pasa del nivel regional a nivel de cada país, se hace evidente que para algunos países la situación es aún más retadora. Por ejemplo, el trabajo de la Cepal arriba citado muestra que mientras países como Chile y Costa Rica deberán dedicar solo un 0,46% y 1,05% de sus PIB anual a inversiones sectoriales para lograr cumplir el ODS 6, ese porcentaje en Honduras y El Salvador se eleva a un 4,44% y 2,46% respectivamente.

³⁶ Toma en consideración a los siguientes países: Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua, México, Panamá, República Dominicana, Bahamas, Barbados, Guyana, Jamaica, Surinam, Trinidad y Tobago, el Estado Plurinacional de Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, la República Bolivariana de Venezuela, Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay.

³⁷ Toma en consideración a los siguientes países: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Honduras, México, Perú y Rep. Dominicana.

Reconociendo la demanda por recursos presupuestales que vienen desde otros sectores económicos, incluso con menor capacidad de generar recursos propios que el sector de agua y saneamiento, se acepta que es poco probable o directamente imposible que los países de la región logren multiplicar en esa proporción su esfuerzo en dedicar mayores recursos a este sector. Este nivel de inversión exige una diversificación de las fuentes de entrada, provenientes tanto del sector público como del comercial.

Sin embargo, es ampliamente reconocido que los intermediarios financieros privados tienden a mostrar una reticencia considerable cuando se trata de otorgar créditos a municipios y prestadores de servicios públicos de tamaño mediano o pequeño, lo que ha configurado en un déficit de financiamiento en el sector (Johannessen, y otros, 2014). Esto, se debe en gran medida a la percepción de un mayor riesgo de impago de las empresas del sector, originada por la inexistencia de una cultura de pago por los servicios de AyS en muchos países de la región y a la dificultad de cubrir, a través de los ingresos generados por tasas y cargos administrativos relativamente bajos, los costos fijos asociados con la preparación y el seguimiento de transacciones crediticias. En consecuencia, estos intermediarios financieros privados suelen dar prioridad a préstamos de mayor cuantía destinados a empresas y municipios de mayor envergadura; o alternativamente, afectan los términos de financiamiento que se otorga, de manera que, para reducir los riesgos, los inversores comerciales suelen exigir garantías y presentar altas tasas de interés (OCDE, 2019).

A esas limitaciones al acceso al crédito se debe adicionar el enorme descalce entre los plazos de los créditos y los períodos de recuperación (depreciación) de los principales activos del sector de agua y saneamiento. Recordemos que las empresas del sector realizan en inversiones activos con vidas útiles entre 20 y 40 años mientras que el poco financiamiento puesto a disposición del sector por los intermediarios crediticios en la mayoría de los países de la región tiene plazos de alrededor de solo 10 años.

Así pues, hasta este punto, existen dos mensajes clave que valen la pena destacarse. En primera medida, existe un serio rezago en la región ALC, que exige una importante movilización de recursos financieros, por parte del sector público y privado, para alcanzar el ODS 6 en ALC.

En segunda medida, el desarrollo de inversiones sectoriales, enmarcadas en la economía circular, se configuran en una alternativa importante, a partir de la cual, los hacedores de política pública y directamente los operadores de los sistemas de agua potable y saneamiento, pueden atacar el cumplimiento del ODS, mientras crean un círculo virtuoso que le permita mayor capacidad económica y de inversión a los operadores, a la vez que se reduce por ejemplo, las emisiones de metano, y se previene la eutrofización de las fuentes de agua.

Naturalmente estas inversiones con enfoque circular también enfrentan las mismas barreras que enfrenta el sector a nivel general para acceder a financiamiento. Por ende, en este capítulo, se pretende, en principio, presentar un análisis de las diferentes fuentes de financiamiento de las que puede hacer uso el sector, para financiar proyectos de economía circular. Sin embargo, se pretende mucho más. De lo que se trata es de lograr identificar los mecanismos financieros que mejor encajan o empalman en el financiamiento de los dos tipos de proyectos propuestos en este documento: i) La recuperación de metano, para su aprovechamiento energético en PTAR con capacidades instaladas inferiores a 500 l/s, que tan proliferadas están en la región de ALC; y ii) La recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita, en PTAR con capacidades instaladas superiores a los 3.000 l/s.

Se busca retratar las diferentes ventajas y barreras que ofrecen estos mecanismos y ofrecer a partir de este análisis, una serie de recomendaciones estratégicas para financiar proyectos de economía circular en el sector de agua y saneamiento en ALC.

A. Financiamiento tradicional en el sector de AyS en América Latina y el Caribe

La financiación en el sector de agua y saneamiento en la región de ALC proviene principalmente de dos fuentes: las transferencias públicas de los gobiernos centrales y locales, junto con las tarifas recaudadas por los operadores de los sistemas. Estos, en diferentes medidas según el país, siguen siendo el principal medio a través del cual el sector se financia para cubrir sus costos de operación, mantenimiento y expansión.

En contraste, el papel del sector privado en el financiamiento no ha sido tan destacado. Según la OCDE (2022), las inversiones comerciales representan solo el 6% de las inversiones totales en saneamiento y suministro de agua. Estimaciones más recientes indican que tan solo el 3% del financiamiento privado movilizado se destinó al sector de agua y saneamiento entre 2018 y 2020 (OCDE, 2023b). Tomando como ejemplo Colombia, el apalancamiento del sector en la banca comercial fue solo del 10,9%, obteniendo préstamos locales en promedio de US \$35,5 millones al año entre 2009 y 2019 (K&M Advisors, 2019, citado en Grez, Vogt, & Cantu, 2023).

Estas cifras contrastan significativamente con las considerables necesidades de inversión del sector, especialmente teniendo en cuenta la importancia de la banca comercial en la región. En América Latina, existen más de 540 bancos comerciales (FELABAN, 2024), con activos que superan los USD3.875.329 millones (64,6% del PIB de ALC) y una cartera total que excede los USD1.777.327 millones (29% del PIB de ALC) hasta marzo de 2021.

La baja participación de la banca comercial en el otorgamiento de créditos al sector de agua y saneamiento se explica por la alta percepción de riesgo y el descalce entre los plazos de los préstamos comerciales (entre cinco y diez años) y las vidas útiles de los activos de agua y saneamiento (entre 20 y 40 años). Esta situación ha limitado históricamente la participación de la banca comercial en el financiamiento del sector.

Recientemente, se ha destacado la ventaja de combinar la financiación para el desarrollo con la financiación privada para movilizar mayores volúmenes de capital en términos más favorables que con el capital privado solo. Las iniciativas del BID han demostrado que, mediante el uso de financiación combinada, en promedio, 1 dólar puede generar 10 dólares del sector comercial (BID, 2018b), mostrando el potencial de este enfoque cuando se implementa correctamente.

Por lo tanto, una alternativa a considerar en la financiación de proyectos de recuperación de metano y nutrientes es el financiamiento privado combinado con otros mecanismos, con el objetivo de disminuir el riesgo percibido por la banca y mejorar las condiciones de crédito para el desarrollo de los proyectos.

B. Financiamiento climático y sostenible para proyectos de economía circular en AyS en América Latina y el Caribe

La creación de fuentes de financiamiento climático (FC) y sostenible surge del creciente interés internacional en abordar el deterioro ambiental del planeta y su relación con la sostenibilidad del desarrollo económico y social. Este interés se refleja en la definición de objetivos sociales, ambientales y de mitigación y adaptación climática, que forman parte de los ODS, así como de los compromisos establecidos en los Acuerdos de París.

El financiamiento climático hace referencia al financiamiento local, nacional o transnacional —de fuentes públicas, privadas y alternativas— que busca respaldar las acciones de mitigación y adaptación para hacer frente al cambio climático (The Nature Conservancy, s.f.). El FC trata de todos aquellos flujos de capital destinados a proyectos y políticas que reducen las emisiones de GEI, ya sea de adaptación y/o mitigación que buscan reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de los sistemas socio—ecológicos ante efecto del cambio climático (GIZ, 2021). El financiamiento sostenible, por su parte, se encuentra directamente enmarcado en el cumplimiento del plan de acción propuesto por los ODS para el 2030.

Estos mecanismos tienen como objetivo canalizar recursos de fuentes nacionales, internacionales y privadas para cumplir con metas globales de cambio climático, en términos de mitigación y adaptación; y con los ODS. Los instrumentos de financiación comprenden diferentes opciones, como lo son donaciones o recursos no reembolsables, los préstamos (incluyendo operaciones bajo condiciones concesionales, las garantías y el capital privado) (Schalatek & Watson, 2021).

Recuadro 1

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París

La Agenda de los ODS cuenta con 17 Objetivos e implica 167 metas, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades. Cada objetivo tiene metas específicas que deben ser alcanzadas en un horizonte de 15 años (2015-2030) (UNEP, 2020). En relación con el sector de agua y saneamiento, el ODS 6 pretende lograr un acceso universal y equitativo al agua potable y a servicios de saneamiento e higiene adecuados, así como mejorar la calidad del agua a nivel global. En este sentido, tanto los gobiernos como las empresas prestadoras del sector deben gestionar de forma sostenible los recursos hídricos en la provisión de sus productos y servicios.

Por otro lado, el Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante^a. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2, preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales (UNFCCC, 2022).

Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el límite de las emisiones de GEI lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo XXI^b.

El Acuerdo establece un marco de gobernanza para la cooperación internacional en materia de cambio climático para el mediano y largo plazo y un grupo de elementos para determinar la conducta de los países y de los actores económicos y sociales. En este sentido el acuerdo establece: i) un marco para impulsar la acción climática especialmente en las principales economías del planeta, aunque todos los países que son Partes del Acuerdo habrán de participar de los esfuerzos para la adaptación y la mitigación; ii) un marco de transparencia para la acción, que incluye procesos robustos para que los países midan, reporten y verifiquen (MRV) los resultados de sus acciones. Esto permite a la comunidad internacional monitorear la implementación de las acciones nacionales para facilitar los procesos de transformación; iii) un procedimiento que fomenta compromisos crecientes de los países en acciones de mitigación y adaptación. Asimismo, establece un cronograma para que aumenten progresivamente sus esfuerzos a medida que incrementan sus capacidades; y iv) conjunto de mecanismos internacionales para fomentar el financiamiento climático, el intercambio de derechos de emisión a través del comercio de emisiones, el desarrollo y la transferencia de tecnología, y la construcción de capacidades, especialmente para los países en desarrollo (BID, 2018a).

Este acuerdo a su vez se materializa en las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) las cuales representan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático. Las NDC brindan indicaciones claras de la dirección de las inversiones que cada país prevé seguir e impulsar, para contribuir a que la economía global realice un recorrido hacia un crecimiento bajo en carbono y resiliente al cambio climático.

Del mismo modo, el Acuerdo implica nuevos desafíos estratégicos para los bancos nacionales de desarrollo (BND), como el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos—BANOBRAS en México y de la Financiera de Desarrollo Territorial—FINDETER en Colombia, e involucra, en general, al sector financiero, internacional, regional y nacional. Entre estos desafíos se destaca la necesidad de efectuar cambios y ajustes profundos en las reglas de registro y seguimiento de operación actuales y la evolución que se espera ocurra en las regulaciones prudenciales existentes. En este contexto, los responsables de las instituciones financieras deben aplicar herramientas eficaces para identificar los riesgos y aprovechar las oportunidades, al tiempo que atienden, en el corto plazo, las presiones regulatorias y las de sus accionistas que se relacionan con integrar resultados y solidez.

Fuente: Elaboración propia.

^a El Acuerdo de París consta de tres partes fundamentales: i) el propio Acuerdo de París, que está estructurado como un anexo del texto de las decisiones adoptadas y es legalmente vinculante. Este constituye el núcleo de lo negociado y contiene elementos estables y perdurables para la acción climática, que deben permanecer sin cambios sustanciales; ii) la decisión de la Conferencia de las Partes: 8, que incluye el proyecto de decisión mediante el cual se decide apro-bar el Acuerdo de París. Además, en esta decisión se abordan otros aspectos importantes, como los relacionados con las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (INDC), la mitigación, la adaptación, el financiamiento, y las pérdidas y daños. Estos últimos aspectos se prefirieron no incluir en el cuerpo del Acuerdo; y iii) una Agenda para la Acción que constituye una agenda de soluciones y compromisos complementaria a los acuerdos formales adoptados en la COP 21. De esta agenda se derivan numerosos compromisos para la acción, con el objetivo de reducir las emisiones de GEI y aumentar la capacidad de adaptación.

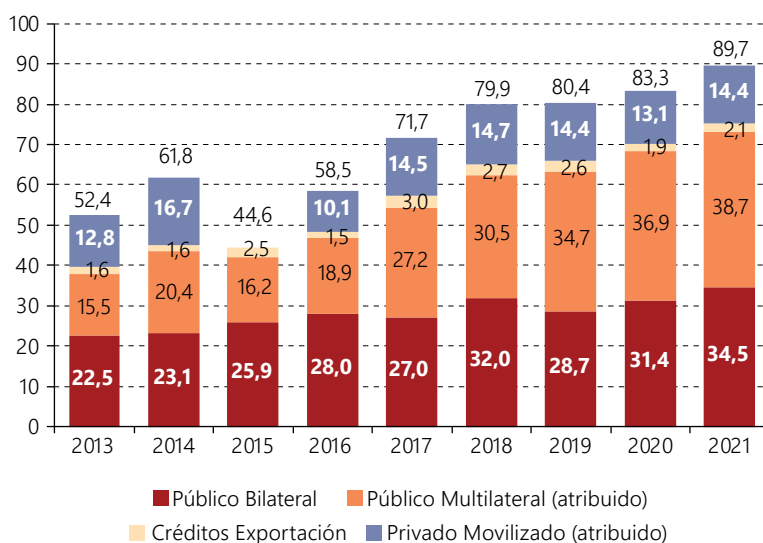
^b La noción de neutralidad climática implica que las emisiones netas de carbono son igualadas a cero. En este contexto, se busca un equilibrio entre la cantidad de gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera y la cantidad retirada.

Por ejemplo, el Acuerdo de París incluye instituciones que ejercen como mecanismo financiero, entre las cuales se destacan el Fondo Verde del Clima (GCF, por sus siglas en inglés) y el Fondo Mundial Ambiental (GEF, por sus siglas en inglés), que asignan los recursos financieros incrementales que se canalicen para el financiamiento climático. A partir de ello, se emite una señal poderosa a los gobiernos, a las instituciones financieras públicas y privadas y, en general, a los agentes económicos para repensar/ajustar los criterios que sustenten la toma de decisiones relativa a la inversión (BID, 2018a).

De acuerdo con cifras consolidadas por la OCDE (2023a)³⁸, el FC para países en desarrollo se había incrementado en 2021 en el 71,1% respecto del registrado en el 2013, llegando a cerca de USD 90 billones (USD 90.000 millones). No obstante, se debe destacar que el valor registrado en 2021 no alcanza aún el objetivo acordado para los países desarrollados en el sentido de proporcionar y movilizar anualmente USD 100 mil millones hacia los países en desarrollo que se había fijado para 2020. La mayor parte del FC otorgado en la década 2010-2020 a países en desarrollo se han dirigido a medidas de mitigación del cambio climático, aunque se destaca que el financiamiento proporcionado para medidas de adaptación sigue en aumento y ya representa un tercio del total (ibid.).

Las fuentes de financiación que cuentan con la mayor participación en el periodo 2013-2021 corresponden a recursos públicos bilaterales y multilaterales, representando en conjunto el 72,5% del total de recursos movilizados en 2013 y el 81,6% del total en 2021; se destaca que los recursos públicos multilaterales presentan el mayor crecimiento en participación dentro de todas las fuentes, al pasar del 29,5% del total en 2013 al 43,1% en 2021 (ver gráfico 18).

Gráfico 18
Financiamiento climático para países en desarrollo 2013-2021, según tipo de fuente
(En miles de millones de dólares corrientes)



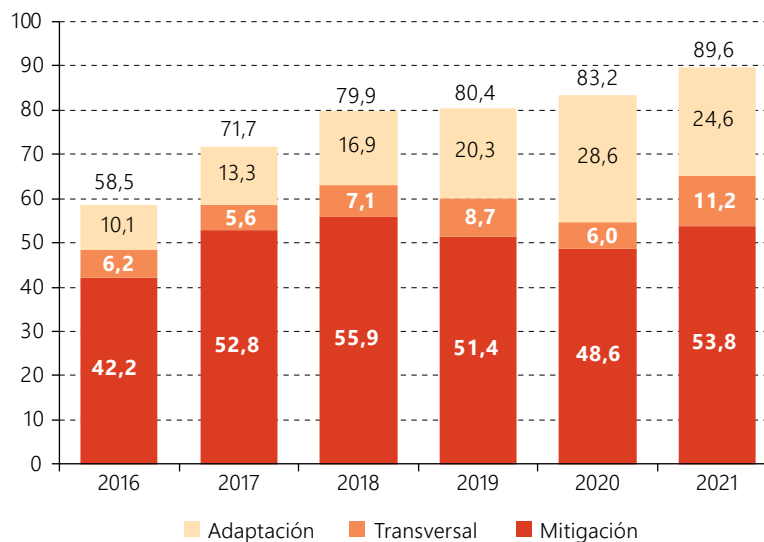
Fuente: OCDE (2023a).

Debe anotarse que esta financiación pública (multilateral y bilateral) se soporta en recursos de crédito, los cuales representan aproximadamente el 68% de los fondos movilizados en 2021 (OCDE, 2023a). Le siguen los recursos de donación o subvención, con una participación del 28%. Finalmente, con una participación del 3,8% en el total, se encuentran los recursos asociados con la modalidad de *equity*.

³⁸ Que están soportadas en los informes bienales a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en informes del Comité de Asistencia al Desarrollo de la OCDE y en las estadísticas del Grupo de Crédito a la Exportación e informes complementarios a la OCDE.

Por otro lado, el financiamiento ha sido dirigido hacia acciones de mitigación, adaptación o de carácter transversal. El comportamiento observado durante el periodo 2016-2023 se ilustra en el gráfico 19. A partir de estos datos, se puede concluir que, aunque la categoría de mitigación sigue teniendo la mayor participación en el total de los recursos asignados (72,1% en 2016 y 60% en 2021), se destaca el notable incremento en la movilización de fondos destinados a la adaptación. Esta categoría experimenta un aumento significativo, pasando de USD 10,1 billones en 2016 a USD 28,6 billones, en 2020 (crecimiento del 29,7% anual), aunque con una reducción de casi el 14% en el 2021. Asimismo, se destaca el incremento del 86% en el último año, en el monto de recursos movilizados para la categoría de acciones transversales, que alcanza los USD 11,2 billones en 2021.

Gráfico 19
Financiamiento climático para países en desarrollo 2013-2021, según categorías de financiamiento
(En miles de millones de dólares corrientes)



Fuente: OCDE (2023a).

1. Los fondos climáticos

En cuanto a la financiación otorgada por los principales fondos multilaterales para el clima que están asociados con el cumplimiento de metas derivadas de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y Acuerdo de París, debe anotarse que en materia de mitigación, está orientada a apoyar a los países en desarrollo en la implementación de acciones prioritarias, incluyendo programas de energía renovable y eficiencia energética, transporte más sostenible, así como de reducción de emisiones asociadas con los sectores de residuos sólidos, agua potable y saneamiento (ver cuadro 33).

Cuadro 33
Principales fondos que financian acciones de mitigación a nivel global (2003-2021)
(En millones de dólares corrientes)

Fondo	Comprometido	Depositado	Aprobado	Proyectos aprobados	Valor promedio aprobado por proyecto	Participación porcentual en el valor total comprometido
Fondo de Tecnología Limpia (CTF)	5 783,2	5 783,2	5 657,5	166	34,1	18,4
Fondo Verde del Clima (GCF) (GCF-MIR, GCF-1)	20 321,3	12 921,1	3 944,5	49	80,5	64,8

Fondo	Comprometido	Depositado	Aprobado	Proyectos aprobados	Valor promedio aprobado por proyecto	Participación porcentual en el valor total comprometido
Fondo Mundial Ambiental - GEF (GEF-4, 5, 6 y 7)	4 080,9	4 068,7	2 336,1	542	4,3	13,0
Scaling Up Renewable Energy Program in Low Income Countries (SREP, Programa para el aumento del aprovechamiento de fuentes renovables de energía en países de bajos ingresos)	778,6	778,6	674,2	83	8,1	2,5
Global Energy Efficiency and Renewable Energy Fund (GEEREF, Fondo mundial para la eficiencia energética y las energías renovables)	281,5	275,5	223,6	19	11,8	0,9
Partnership for Market Readiness (PMR, Asociación para la preparación de mercados)	131,5	129,8	82,4	42	2,0	0,4
Total fondos	31 377,0	23 956,9	12 918,3	901	14,3	100,0

Fuente: Climate Funds Update (Watson, Schalatek, & Evéquoz, 2022).

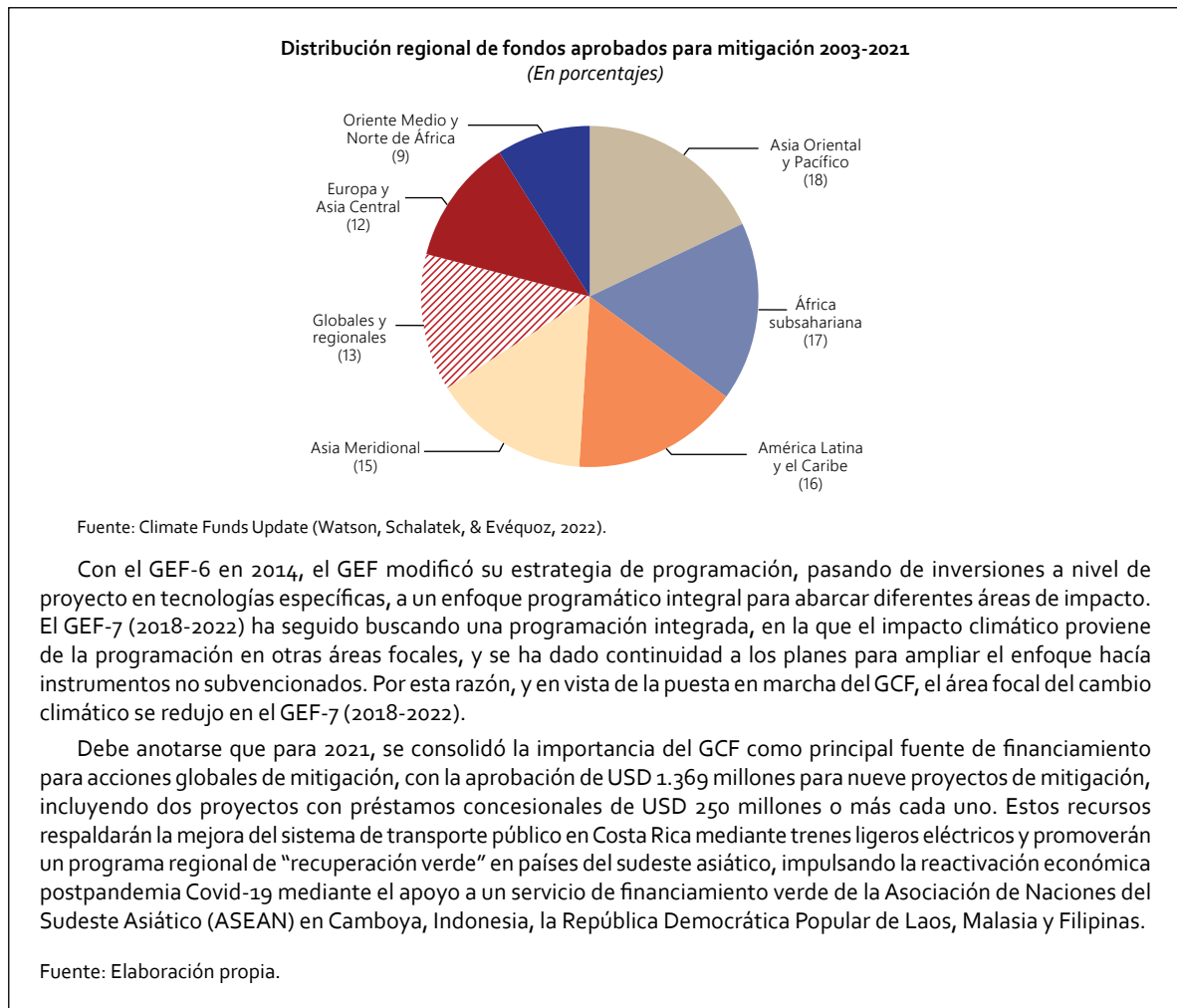
Según lo documentado en el cuadro 33, el total acumulado del financiamiento aprobado para la mitigación de los fondos climáticos era de cerca USD 12.900 millones en el periodo comprendido entre 2003-2021 (Watson, Schalatek y Evéquoz, 2022). En el análisis por fuente de financiamiento, se destaca que los recursos comprometidos en el periodo 2003-2021 por el GCF y el GEF, que con un total de USD 24.402 millones, representan en conjunto cerca del 78% del total de fondos que apoyan las acciones de mitigación en países en desarrollo.

Recuadro 2 **Regiones y países receptores de financiamiento para la mitigación**

El gráfico 20 ilustra la distribución del financiamiento climático para la mitigación en diversas regiones del mundo, considerando los principales fondos internacionales mencionados en la sección anterior. En el caso de ALC, su participación del 16% en el total de recursos aprobados durante el periodo 2013-2021, equivalente a aproximadamente USD 2.067 millones, se muestra como relativamente equitativa en comparación con otras regiones destacadas en el Gráfico 20. Sin embargo, esta equidad se ve modificada al analizar la asignación por países.

En el periodo 2003-2021, diez países han recibido el 48% del financiamiento total destinado a la mitigación (Watson, Schalatek, & Evéquoz, 2022). Los cinco principales receptores de fondos aprobados, caracterizados por altas tasas de crecimiento económico y un significativo potencial de mitigación, concentran aproximadamente el 27% de estos fondos. India lidera con USD 1.300 millones, seguida por Indonesia con USD 635 millones, Sudáfrica con USD 619 millones, Turquía con USD 498 millones y México con USD 435 millones.

Es evidente que existe una tensión entre aprovechar las oportunidades de mitigación a gran escala en pocos países e invertir en soluciones de menor escala que benefician a todos los países en desarrollo (Watson, Schalatek y Evéquoz, 2022). En ese sentido, se destaca que con el amplio número de proyectos de menor escala apoyados por el GEF y el SREP se ha buscado mejorar el suministro de energía a población de bajos ingresos a través de iniciativas de electrificación rural que emplean fuentes de energía renovable.



Según Watson, Schalatek y Evéquo (2022), los fondos detallados en el Cuadro 33 exhiben notables disparidades tanto en la escala de los proyectos y programas de mitigación que pueden financiar, como en el número de países en desarrollo a los que ofrecen respaldo.

Por ejemplo, el GCF muestra un promedio más alto de asignación de recursos por proyecto en comparación con los otros fondos, alcanzando un valor medio de USD 84,5 millones. Además, destaca por su significativa contribución al total de recursos comprometidos dentro del grupo de fondos analizados, representando el 64,8%³⁹.

En el caso de del Fondo de Tecnología Limpia (CTF), los 166 proyectos aprobados en el marco por un monto total de USD 5.657 millones, en su mayoría consisten en préstamos programáticos que benefician a un número reducido de economías de mercado emergentes con el objetivo de lograr una acción a mayor escala. Resulta relevante mencionar que el promedio simple de recursos comprometidos por proyecto en el CTF es el segundo más alto de todo el grupo de fondos, alcanzando los USD 34,1 millones por proyecto.

³⁹ En el periodo 2017-2021, el GCF había aprobado USD 3.900 millones para proyectos en mitigación, de los cuales más de dos tercios corresponden a préstamos en condiciones concesionales. Durante ese mismo periodo, el GCF había aprobado 47 proyectos con múltiples enfoques por valor de USD 3.100 millones, siendo el mayor de ellos un programa de USD 378 millones para los Sustainable Energy Financing Facilities (SEFF, servicios de financiación de la energía sostenible) en 10 países.

Por otro lado, los 542 proyectos financiados en el marco del GEF-4, 5, 6 y 7 son subvenciones de pequeña escala destinadas a apoyar la mitigación e incluyen a la mayoría de los países en desarrollo. Estos proyectos representan menos de la mitad de los recursos asignados por el CTF, con un promedio de asignación por proyecto de USD 4,3 millones.

En el periodo 2003-2021, excluyendo el GCF, los recursos comprometidos con los fondos mencionados en el Cuadro 3 provienen principalmente del Reino Unido, Estados Unidos, Japón, Alemania y Francia, países que representan el 74% de los USD 11.500 millones del total de recursos comprometidos.

a) Fondo de Tecnología Limpia (CTF)

El CTF es un fondo que administra el Banco Mundial orientado a la promoción de una mayor escala de financiamiento para la demostración, despliegue y transferencia de tecnologías bajas en carbono con un potencial significativo de ahorro a largo plazo de GEI; los recursos están dirigidos fundamentalmente a tecnologías bajas en carbono con un potencial significativo para reducir emisiones de GEI en países de ingresos bajos y medianos.

El fondo apoya diferentes áreas que son objeto central de financiación, como son las energías renovables, eficiencia energética y transporte. Como organizaciones elegibles para el financiamiento se encuentran los programas de inversión diseñados para alcanzar los objetivos definidos del nivel nacional, esto incluye el nivel subnacional, centrando la actividad en una provincia/estado-departamento/municipio, el nivel regional y a través del sector privado o de alianzas público-privadas. Los proyectos elegibles deben cumplir con los siguientes criterios de selección: i) potencial de ahorro de emisiones de GEI ii) costo-efectividad iii) potencial de demostración en escala iv) desarrollo del impacto v) potencial de ejecución vi) costos adicionales y riesgos.

El CTF emplea una combinación de instrumentos financieros, que incluyen subvenciones, subvenciones contingentes, préstamos concesionales, capital y garantías, para hacer que la inversión en tecnologías bajas en carbono sea más atractiva para los inversores del sector público y privado en países de ingresos bajos y medios.

En términos de movilización de fondos durante el periodo 2003—, hasta diciembre de 2021 el CTF había invertido, cerca de USD 803 millones en proyectos en la región de ALC (Climate Investments Funds, s.f.). Ocho países de ALC han sido receptores de financiación del CTF (México, Honduras, Nicaragua, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil y Chile).

Recuadro 3

Experiencias de financiamiento CTF en algunos países de la región

En el caso de Colombia, el financiamiento del CTF por valor de USD 92,4 millones apoyó la compra de una flota piloto de buses de tecnología limpia en Bogotá, así como otras mejoras del transporte público en siete áreas metropolitanas de Colombia; los fondos del CTF también han apoyado ampliar el acceso a la financiación para proyectos de eficiencia energética y producción limpia, alentando a las instituciones financieras a desarrollar programas de préstamos para empresas privadas.

El plan de inversión del CTF de México por valor de USD 378 millones está orientado a superar barreras institucionales, regulatorias y económicos para la promoción a gran escala de tecnologías bajas en carbono. Al compensar los costos y riesgos iniciales, el financiamiento del CTF se puede utilizar para demostrar la viabilidad y ampliar las inversiones privadas en energía geotérmica y solar, transporte urbano, además de viviendas residenciales, industrias y pequeñas empresas.

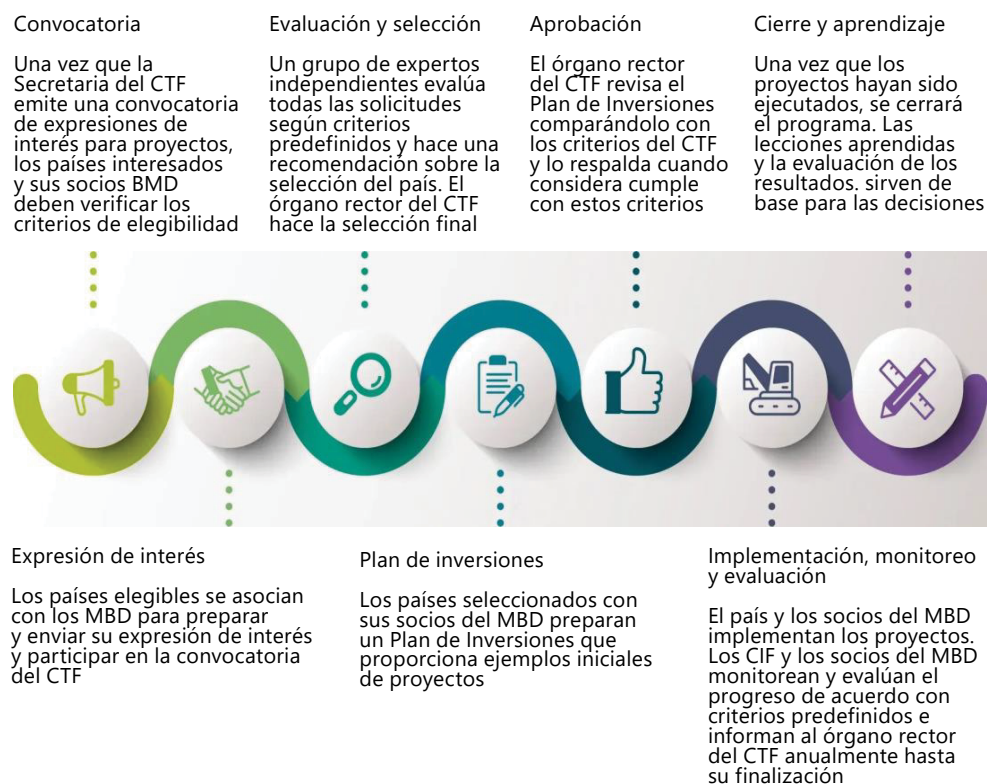
Para Nicaragua el CTF apoya el Programa de Exploración y Mejora de Transmisión Geotérmica del PINIC por USD 9,5 millones (PINIC: Plan de Inversión de SREP de Nicaragua; SREP (es la sigla en inglés de *Scaling up Renewable Energy Program in Low Income Countries*). En Perú el CTF financia un programa de Financiamiento de soluciones de transporte eléctrico sostenible por USD 9,98 millones. En el caso de Brasil se han financiado dos proyectos de transporte sostenible por valor de USD 19,24 millones. El plan de inversión del CTF de Chile por valor de 77 millones de dólares tiene como objetivo superar estas barreras y estimular el desarrollo del mercado. En particular, el financiamiento del CTF está ayudando a reducir el riesgo de inversiones en desarrollo geotérmico en etapas iniciales y energía solar a gran escala, incluida la primera planta de energía solar concentrada de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe resaltar que solo un estimado de 1% de los recursos de CTF se han dirigido a apoyar iniciativas de aprovechamiento de energía a partir de residuos (Climate Investments Funds, s.f.), lo que pone de manifiesto que, aunque el sector de agua y saneamiento podría acceder a financiamiento, para programas de generación de energía a partir del aprovechamiento energético del metano; en la práctica, esta área temática ha tenido poca cabida en el pasado. El Diagrama 10 resume el ciclo de los proyectos a ser financiado bajo el CTF.

Ahora bien, pese a que sólo se puede acceder al financiamiento del CTF a través de los Bancos Multilaterales de Desarrollo (Grupo del Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, Banco Africano de Desarrollo, Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo y el Banco Asiático de Desarrollo), entidades que actúan como socios implementadores; y dado que el financiamiento del CTF, se ubica en promedio sobre los USD 30 millones por proyecto; no se vislumbra una viabilidad del acceso a esta fuente de financiamiento, para el aprovechamiento energético del metano en PTAR que operan a escalas inferiores a los 500 l/s.

Diagrama 10
Ciclo de procesos para financiación de proyectos por el CTF



Fuente: Adaptado de CIF (Climate Investments Funds, s.f.).

Además, considerando que el sector de agua y saneamiento no se encuentra dentro del foco de operación del CTF, no se vislumbra viabilidad para financiar proyectos de recuperación de nutrientes mediante precipitación de estruvita, en PTAR con capacidades superiores a los 3.000 l/s.

Sin embargo, se podría acceder a recursos del CTF, en la medida en que se considere una escala más amplia que la asignada a proyectos individuales, es decir, en la medida en que se considere la agregación de proyectos de recuperación de metano.

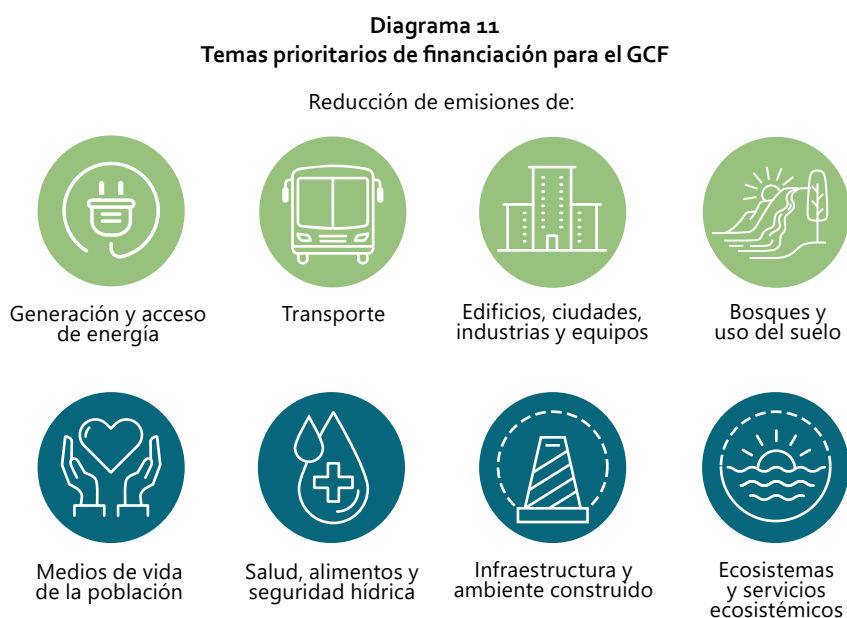
El elemento central para acceder a recursos del CTF es la formulación de un plan de inversión bajo el liderazgo del país receptor que identifique al sector de AyS como una de las principales fuentes de emisiones de GEI y que existan oportunidades estratégicas para su mitigación.

El alcance de estos planes se debe adaptar y corresponder con las prioridades nacionales. Posteriormente, el CTF trabaja para obtener cofinanciamiento y ampliar el acceso a capital a los proyectos de energías limpias alentando a las instituciones financieras a desarrollar programas de préstamos para empresas privadas. Más allá de los planes de inversión, los países también pueden implementar proyectos que prioricen las inversiones del sector privado en áreas tecnológicas temáticas específicas.

b) Fondo Verde del Clima (GCF)

El GCF es un fondo global establecido por la CMNUCC y es la principal fuente de FC internacional para países en desarrollo. El GCF tiene como objetivo apoyar un desarrollo bajo en emisiones y resiliente al clima, ayudando a movilizar recursos de una amplia gama de fuentes, y así escalar la acción climática en estos países. Así las cosas, el acceso a la financiación climática a través del GCF es de suma importancia para países de Latinoamérica. Con corte a marzo de 2023, los fondos aprobados por el GCF en temas de mitigación ascendían a cerca de USD 30.000 millones (GCF, 2023).

El diagrama 11 resume las 8 áreas focales o sectores prioritarios a los cuales el GCF dirige sus recursos de financiación, las cuales se relacionan con dos categorías principales: reducción de emisiones (mitigación) y adaptación (incremento de resiliencia).



Fuente: Tomado de guías del GCF (GCF, 2023).

En la categoría de mitigación (reducción de emisiones) se priorizan las áreas de generación y acceso de energía, transporte edificios, ciudades industrias y equipos y el área de bosques y uso del suelo. En la categoría de adaptación (incremento de resiliencia) existen cuatro temas estratégicos: medios de vida de la población, salud, alimentos y seguridad hídrica, infraestructura y ambiente construido y ecosistemas y servicios ecosistémicos. Las iniciativas del sector de AyS que busquen obtener financiamiento del GCF y estén relacionadas con la utilización del metano generado en PTAR se clasifican dentro de la categoría de mitigación, específicamente en el área temática de edificios, ciudades, industrias y equipos; el financiamiento destinado a la reducción del metano es alarmantemente bajo y representa menos del 2% del financiamiento climático mundial (Banco Mundial, 2023) y la mayoría de los proyectos aprobados

a la fecha el GEF, GCF y MDL en temas de residuos, han estado asociados con el aprovechamiento de residuos del sector agropecuario. En cambio, la postulación de proyectos destinados a la recuperación de N y P en las PTAR se ubica en la categoría de adaptación, dentro del área temática de salud, alimentos y seguridad hídrica.

El GCF cuenta con tres ventanas de financiación: i) alistamiento, ii) ventanilla de preparación de proyectos (Project Preparation Facility, PPF), y iii) propuesta de financiación. El Anexo 7 muestra el ciclo de actividad de los proyectos/programas financiados por el GCF.

Bajo la primera ventana de financiación, se busca fortalecer las capacidades institucionales nacionales de las entidades interesadas en intermediar con el GCF. Bajo la segunda, se busca apoyar la preparación de proyectos y programas, especialmente aquellos de las categorías micro (<USD 10 millones) a pequeño (USD 10-50 millones), facilitando el envío de una correspondiente propuesta de financiación dentro de dos años (GEF, 2020). Bajo esta ventana, se contempla financiación desde las etapas tempranas de identificación del proyecto, desarrollo de una nota conceptual y el establecimiento de condiciones habilitantes, hasta las etapas tardías en donde se incluye el apoyo para la realización de las debidas diligencias y la estructuración final del proyecto. Este apoyo incluye actividades limitadas a: estudios de pre y factibilidad, diseño de proyectos, estudios ambientales, sociales y de género (DNP, 2017).

Finalmente, la ventana de financiamiento de proyectos está dirigida a proyectos completamente formulados que cuentan con los estudios técnicos previos necesarios. Aunque hemos anotado que la financiación promedio por proyecto se ha ubicado por los USD 80 millones, no existen montos mínimos para acceder a financiación por parte de este fondo.

Recuadro 4 Experiencias de financiamiento GCF en algunos países de la región

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, como la Autoridad Nacional Designada ante el GCF, ha obtenido la aprobación de 8 proyectos con una financiación total de USD 108 millones. Además, se han aprobado 3 proyectos para la etapa de preparación, con una asignación total de USD 3,7 millones. El Salvador fue pionero en acceder a los fondos del GCF en Centroamérica.

Hasta mediados de 2023, México contaba con ocho proyectos aprobados por la Junta del GCF, con una financiación total de USD 79,1 millones, siendo uno de ellos nacional y siete internacionales/regionales. Adicionalmente, se habían aprobado cuatro proyectos de preparación con un valor total de USD 1,6 millones. Estos proyectos se enfocan en acciones de adaptación y mitigación para hacer frente al cambio climático en regiones estratégicas de todo el país. Sin embargo, ninguno de los proyectos aprobados hasta ese momento incluía actividades específicas para la mitigación de emisiones en el sector de AyS.

Por su parte, Panamá cuenta con 10 proyectos aprobados por el GCF, con recursos asignados por USD 123,9 millones, además de USD 5,5 millones para preparación de 4 proyectos. Acorde con el Plan de Acción Climática de Panamá de 2022, el sector residuos aporta el 4.2% de emisiones de GEI (1.904.9 kt CO₂eq). En el marco de la COP 27 de la CMNUCC, autoridades de Panamá declararon que si bien el sector Residuos no es el principal emisor, es de gran relevancia debido a que el aumento de la población, sumado al cambio de patrones de consumo y producción, han dado como resultado un incremento en la cantidad y diversidad de residuos sólidos y más allá de contribuir a la crisis climática y ambiental puede impactar en la salud pública. Acorde con los NDC de Panamá (2020), el sector residuos no ha sido incluidos entre los sectores claves de acción, pero forma parte de los Inventarios Nacionales, por los que se ven reflejados en el análisis de necesidades.

Fuente: Elaboración propia, con base en consulta de GCF (2024).

Si se realiza una breve revisión al portal del GCF, se podrá notar que del total de fondos aprobados, un estimado de USD 884 millones, se han destinado a proyectos relacionados con el agua (GCF, 2024), con proyectos que implican montos desde los USD 2,3 millones hasta los USD 235 millones. Se destaca

puntualmente, la aprobación de un proyecto en Barbados, por USD 39 millones, el cual contempla entre otras, la actualización de la PTAR de Bridgetown para tratar las aguas residuales a un estándar de calidad de agua terciaria y la instalación de sistemas de recuperación de agua regenerada⁴⁰.

En Colombia, se destaca el proyecto “Mejorando las prácticas de gestión del agua resilientes al cambio climático para las comunidades vulnerables en La Mojana” el cual recibió financiamiento por USD 38 millones, y contempla entre otras acciones, el suministro de implementos para la recolección de agua lluvia y su reúso; el desarrollo de infraestructura para el almacenamiento de agua potable; la rehabilitación de 113 mini acueductos existentes en áreas rurales vulnerables de La Mojana, entre otras.

c) Fondo Mundial Ambiental (GEF)

El GEF, creado en 1991 es una agrupación de fondos dedicados a hacer frente a la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la contaminación y las presiones sobre la salud de la tierra y los océanos. Los recursos financieros asignados en términos de subvenciones y financiación mixta apoyan a los países en desarrollo a enfrentar sus mayores desafíos ambientales y adherirse a los convenios internacionales sobre medio ambiente. En las últimas tres décadas, el GEF ha proporcionado más de USD 2.000 millones y movilizó cerca de USD 120.000 millones en cofinanciación para más de 5.000 proyectos nacionales y regionales (FIDA, 2023). Las inversiones del GEF también han evitado más de 9.000 millones de toneladas de emisiones de CO₂ (con corte al 2022) y han apoyado a los países en desarrollo menos adelantados y a pequeños estados insulares a fortalecer sus mecanismos de respuesta frente al cambio climático y otros riesgos.

Con el GEF-8 (2022-2026) se proyecta el aporte de 29 países donantes por valor de total de USD 5.250 millones, lo cual representa un incremento de casi un 30% en comparación con lo recibido durante el último ciclo operativo de cuatro años (GEF-7: 2018-2022). Este financiamiento impulsará la colaboración internacional para proteger la biodiversidad y frenar las amenazas que plantean el cambio climático, los plásticos y los productos químicos tóxicos (GEF, 2022b).

Con la nueva reposición de recursos del Fondo (GEF-8) que aplica entre julio de 2022 y junio de 2026, la mayor prioridad en la asignación corresponde a la protección de la biodiversidad (llegando al 36% de los fondos totales, ver cuadro 34). De la misma manera, se ha fijado como objetivo que el 60% del financiamiento total del GEF garantice cobeneficios referidos a la biodiversidad, con especial atención en países desarrollo menos adelantados y pequeños estados insulares en desarrollo.

Cuadro 34
Asignación de recursos del GEF-8 (2022-2026)
(En millones de dólares corrientes)

Área focal	Asignación	Participación porcentual
Total biodiversidad	1 919	36,0
Total mitigación cambio climático	852	16,0
Asignaciones por país CCM STAR	524	9,8
Uso eficiente de energía y materiales	103	1,9
Sistemas de energía descarbonizados	94	1,8
Movilidad Cero-emisiones	94	1,8
Soluciones basadas en naturaleza	68	1,3
Programas Integrados	164	3,1
CCM STAR Reservados	328	6,2
CBIT	75	1,4

⁴⁰ Ver detalles en: <https://ewdata.rightsindevelopment.org/projects/fp192-the-rs-reduce-reuse-and-recycle-for-climate-re/#:~:text=The%203R%2DCReWS%20project%20proposes,and%20wastewater%20management%2C%20reuse%20of.>

Área focal	Asignación	Participación porcentual
EAs	145	2,7
Programas regionales y globales	22	0,4
Plataformas globales IP	33	0,6
Proyecto incentivo país IP	53	1,0
Total degradación de suelos	618	11,6
Total químicos y residuos	800	15,0
Convención de Estocolmo	413	7,7
Convención de Minamata	269	5,0
Montreal	13	0,2
SAICM	65	1,2
Contribución Plataformas globales IP	14	0,3
Contribución Proyectos País IP	26	0,5
Total aguas internacionales	565	10,6
Ventana de instrumentos diferentes a subvención	195	3,7
Ventana de innovaciones	12	0,2
Programa de pequeñas donaciones	155	2,9
Compromisos de país	28	0,5
Total programación	5 143	96,5
Presupuestos corporativos	187	3,5
Total recursos	5 330	100,0

Fuente: GEF (2022a).

Nota: STAR: System for Transparent Allocation of Resources (Sistemas de Asignación Transparente de Recursos) inglés); CCM: Climate Change Mitigation (Mitigación de Cambio Climático); CBIT: Capacity-building Initiative for Transparency (Iniciativa de Construcción de Capacidades para la Transparencia); EA: Enabling Activity (Actividad Habilitadora); IP: Integrated Programs (Programas Integrados); SCAIM: Strategic Approach to International Chemicals Management (Enfoque Estratégico de Gestión Internacional de Químicos).

Esto, abre una oportunidad importante para la financiación de proyectos de inversión orientados hacia la introducción de tecnologías que permitan remover N y P de las aguas residuales, evitando superar umbrales críticos de vertimiento, que desemboquen en la acidificación de los océanos y la eutrofización que, como se mencionó en el primer capítulo de este documento (ver mapa 1), es un problema que afrontan los principales ríos de la región, con efectos devastadores sobre los ecosistemas terrestres y marinos (CEPAL, 2020), en especial, sobre la biodiversidad.

Por otro lado, el cuadro 34 permite apreciar que los recursos asignados para la GEF-8 en el área focal de mitigación del cambio climático ascienden a USD 852 millones (16% del total). En principio, esta área focal no incluye recursos definidos de manera específica para iniciativas de aprovechamiento de metano en PTAR. No obstante, si se revisa la asignación teórica/estimada para países en los denominados Programas Integrados (ver cuadro 35), se proyectan cerca de USD 191 millones para el Programa Ciudades Sostenibles. Este programa contempla intervenciones urbanas con un importante potencial de mitigación del cambio climático para ayudar a las ciudades a avanzar hacia un desarrollo urbano resiliente y con bajas emisiones de manera integrada. Como ejemplos de tecnologías y prácticas bajas en carbono necesarias en el sector urbano que hacen parte de este programa, se incluyen el desarrollo de energías renovables (solar, eólica, cogeneración, conversión de residuos en energía), y la gestión de residuos sólidos y de aguas residuales.

Cuadro 35
Asignación teórica para la programación por países de Programas Integrados (IP)

Programas Integrados (IP) del GEF-8	Incentivo	STAR	Contribución de áreas focales No-STAR	Coordinación plataforma	Totales proyectados IP
Sistemas alimentarios	55	164	11	21	252
Restauración de ecosistemas	26	77	0	14	117
Ciudades sostenibles	42	127	0	22	191
Amazonas, Congo y biomas forestales críticos	76	229	7	44	357
Soluciones circulares a la contaminación con plásticos	7	20	47	17	91
Islas azules y verdes	22	67	0	12	101
Océanos limpios y sanos	13	38	47	17	115
Desarrollo infraestructura verde de transporte	30	89	0	11	129
Acelerador cero-neto	30	89	0	11	130
Conservación de vida silvestre para el desarrollo	29	88	0	16	134
Eliminación de químicos peligrosos en cadenas de suministros	5	15	38	11	68
Totales indicativos	335	1 004	151	194	1 683

Fuente: GEF (2022a).

Recuadro 5
Experiencias de financiamiento GEF en El Salvador, México y Panamá

En México, durante el periodo del GEF-6, se implementó "I "Proyecto de Eficiencia Energética Municipal de México (PRES" M)" con contribuciones del GEF por un total de USD 5,89 millones y una contrapartida local de USD 212 millones. Este proyecto logró la realización de aproximadamente 20 subproyectos destinados a mejorar la eficiencia energética en la iluminación pública municipal, así como la instalación de sistemas de energía solar fotovoltaica en 18 instalaciones hospitalarias.

Asimismo, en el marco del GEF-8, se llevan a cabo dos proyectos destacados en México. En primer lugar, el proyecto de "Restauración de ecosistemas y medios de vida sostenibles en el Corredor Biocultural del Centro Occidente de México (COBIOCM)", con una donación de USD 5,15 millones del GEF. En segundo lugar, el proyecto "Acelerar la acción para lograr un México neto cero, positivo para la naturaleza y justo para el clima (México Net-zero)", el cual cuenta con una Nota de Concepto aprobada y recibe aportes del GEF por USD 12,08 millones, además de una cofinanciación de USD 92 millones.

En el caso de El Salvador y Panamá, durante el GEF-3 se ejecutó un proyecto regional para "Acelerar las inversiones en energías renovables a través del BCIE en Centroamérica". Este proyecto incluyó también a Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua, con un aporte del GEF por USD 6,9 millones. Por último, en El Salvador, se logró la aprobación de la Nota de Concepto en el marco del GEF-8 para el "Proyecto IP Bosque Mesoamericano de El Salvador: Promoción de la conservación de los bosques y la gestión integrada del agua en Trifinio", con aportes estimados del GEF por USD 3,1 millones y una cofinanciación de USD 22 millones.

Fuente: Elaboración propia con base en consulta base de proyectos GEF (2024).

Hasta el momento no se registra dentro de la base de datos del GEF, ningún proyecto aprobado por ALC que contemple acciones específicas de recuperación de metano en PTAR, en el sector de AyS, aunque se registran algunos proyectos de mitigación que incluyen acciones asociados con el sector de energía y mejoramiento de medios de vida.

Pese a lo anterior, se detectan desembolsos para el desarrollo de inversiones relacionados con el aprovechamiento del metano en Birmania “Mitigación del cambio climático mediante la recuperación y reutilización de metano procedente del tratamiento de aguas residuales industriales”, el cual cuenta con cofinanciación por USD 24 millones, y una subvención total del GEF que asciende a USD 3,98 millones. Entre los alcances del proyecto, se encontraba la formulación de políticas y el fortalecimiento institucional para la gestión racional de aguas residuales; la demostración de tecnologías piloto de bajas emisiones en parques industriales; y el aumento de la capacidad nacional en tecnología de generación de energía de recuperación de metano y tratamiento de aguas residuales industriales de bajo costo.

También se registra durante el GEF-4, la financiación del “Proyecto de aguas residuales del norte de Túnez”, el cual tenía como objetivo la financiación de infraestructura adicional que permita aumentar la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura, reduciendo así el volumen de descargas de aguas residuales tratadas desde el Gran Túnez al Golfo de Túnez, una zona medioambientalmente sensible del mar Mediterráneo.

2. Mercados de carbono

La adopción de compromisos dirigidos a la reducción de emisiones puede generar impactos económicos negativos para los países. El comercio de derechos de emisión se presenta como una estrategia para atenuar dichos efectos adversos tanto en naciones desarrolladas como en desarrollo (Ludeña, de Miguel, & Schuschny, 2015).

Este mecanismo de intercambio de derechos de emisión se concreta a través de los mercados de carbono, definidos por la UNEP (2022) como sistemas comerciales en los cuales se compran y venden créditos de carbono. Empresas o individuos pueden emplear estos mercados como medio para compensar sus emisiones de GEI, adquiriendo créditos de carbono de entidades que contribuyen a la eliminación o reducción de dichas emisiones. Cabe destacar que un crédito de carbono negociable equivale a una tonelada de CO₂ o a la cantidad equivalente de otro GEI, como el metano, que haya sido reducido, capturado o evitado. Al utilizarse para contrarrestar, capturar o prevenir emisiones, el crédito se convierte en una compensación y pierde su carácter negociable.

En esencia existen dos tipos de mercados de carbono: mercados de cumplimiento (regulados) y mercados voluntarios. Los mercados de cumplimiento se crean como resultado de cualquier política o exigencia normativa nacional, regional y/o internacional. Los mercados voluntarios de carbono, nacionales e internacionales, se refieren a la emisión, compra y venta de créditos de carbono de forma voluntaria. La oferta actual de créditos de carbono voluntarios proviene en su mayoría de entidades privadas que desarrollan proyectos de carbono, o de gobiernos que desarrollan programas certificados por estándares de carbono que generan reducciones y/o eliminación de emisiones. La demanda proviene de particulares que quieren compensar su huella de carbono, corporaciones con objetivos de sostenibilidad corporativa y otros actores que buscan negociar posteriormente esos créditos a un precio más alto para obtener ganancias. Acorde con UNEP (2022), el financiamiento del carbono será clave para la implementación de las NDC, dado que el Acuerdo de París permite el uso de tales mecanismos de mercado a través del Artículo 6.

a) Mercados de cumplimiento

En los mercados de cumplimiento, destacan los Regímenes de Comercio de Derechos de Emisión (RCDE) y el ya desaparecido Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL o CDM, por sus siglas en inglés).

Según UNEP (2022), los RCDE son mercados que operan bajo el principio de *cap-and-trade*, donde las empresas reguladas, o países reciben permisos de emisión o asignaciones por parte de los gobiernos, que establecen un límite máximo total. Las entidades emisoras que superan sus límites permitidos deben adquirir permisos de otras que dispongan de ellos para la venta, generándose así un sistema de comercio. El primer RCDE a nivel mundial fue lanzado por la UE en 2005. En julio de 2021, China introdujo el mercado de emisiones más grande del mundo, el ETS (sistema nacional de comercio de emisiones, por sus siglas en inglés), estimado para cubrir aproximadamente una séptima parte de las emisiones globales de carbono provenientes de la quema de combustibles fósiles. China ostenta actualmente el mercado operativo de comercio de emisiones más grande del planeta, abarcando alrededor de 4.800 millones de toneladas métricas de emisiones equivalentes de CO₂.

Por otro lado, bajo el MDL, adoptado en el marco del Protocolo de Kyoto en 1997, los proyectos de reducción de emisiones en los países en desarrollo generaban créditos de carbono utilizados por los países industrializados para cumplir parte de sus objetivos de reducción de emisiones (Ludeña, de Miguel & Schuschny, 2015). El Protocolo de Kioto entró finalmente en vigor el 16 de febrero de 2005 y finalizó en diciembre de 2020 con la enmienda de Doha⁴¹. Aunque el tratado ha sido reemplazado por el Acuerdo de París, el Protocolo de Kioto sigue siendo una parte importante de la historia reciente de recursos destinados a la mitigación del Cambio Climático.

Al implementar un proyecto que reduce las emisiones de GEI a través del MDL, se generaban certificados de emisiones reducidas (CER), que podían venderse a partes interesadas pertenecientes a un grupo específico de países, para que estas pudieran contabilizarlas como reducciones propias. Dentro del Protocolo de Kyoto, los proyectos MDL se clasificaban en distintos "ámbitos sectoriales", que incluían el ámbito 13 (Manejo y disposición de residuos), asociado con el tratamiento de efluentes. En líneas generales, en proyectos considerados viables de este tipo, el beneficio por la venta de CER era el componente que convierte el VPN del proyecto de negativo a positivo.

En ALC, se registra la aplicación del instrumento MDL, especialmente en proyectos de manejo de metano generado en rellenos sanitarios. La aplicación para PTAR a través del MDL se centró en residuos agrícolas e industriales (CDM, 2024a), con pocos ejemplos aplicados a aguas residuales domésticas, entre los que se destaca la recuperación de metano en el sistema de tratamiento de lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cañaveralejo de EMCALI en Cali, Colombia, asociado con la reducción de 56.632 toneladas de CO₂e/año por valor de USD 9.826,4 (proyecto registrado en 2009) (CDM, 2024b)

b) Mercado de carbono voluntario

Los mercados voluntarios de carbono registran un destacado incremento en los últimos años, impulsado por la creciente cantidad de compromisos de cero emisiones asumidos por empresas de todo el mundo y se estima que los compromisos y los mercados de carbono voluntarios pueden adoptarse e implementarse mucho más rápidamente que los mercados de cumplimiento (The Nature Conservancy, 2021). Un sondeo realizado a inicios de la década actual por el Grupo de Trabajo para la Ampliación de los Mercados Voluntarios

⁴¹ Un proyecto MDL debe proporcionar reducciones de emisiones adicionales a las que se habrían producido de otro modo (United Nations Climate Change, s.f.). Los proyectos debían calificar a través de un proceso de registro y emisión riguroso y público. La aprobación se otorga por Autoridades Nacionales Designadas (DNA, por sus siglas en inglés). El mecanismo es supervisado por la Junta Ejecutiva del MDL, que en última instancia responde ante los países que han ratificado el Protocolo de Kioto. El MDL entró en funcionamiento desde principios de 2006 y había registrado más de 1.650 proyectos, proyectando generar Certificados de Reducción de Emisiones (CER) por un valor de más de 2.900 millones de toneladas de CO₂ equivalente en el primer período de compromiso del Protocolo de Kyoto, 2008-2012. En Doha (Qatar), el 8 de diciembre de 2012, se aprobó la Enmienda de Doha al Protocolo de Kyoto para un segundo período de compromiso, que comenzaría en 2013 y duraría hasta 2020. Como resultado de las negociaciones en el marco de las COP de la CMNUCC sobre las medidas a adoptar después de la finalización del segundo período de compromiso en 2020, se presentó la adopción en 2015 del Acuerdo de París, el cual es un instrumento diferente bajo la CMNUCC y no una enmienda del Protocolo de Kioto

de Carbono —iniciativa liderada por el Instituto de Finanzas Internacionales—y citado por TNC (The Nature Conservancy, 2021) estimó que el mercado voluntario tiene la oportunidad de multiplicarse por quince para financiar hasta 1 gigatonelada de reducciones de emisiones adicionales anuales para 2030.

Si se mantienen altos estándares de integridad y transparencia —para lo cual es muy importante considerar la aplicación de procesos y metodologías de acceso a estos mercados, incluyendo la métrica contabilización de las reducciones de emisiones—, los mercados de carbono pueden ayudar a acelerar la transformación necesaria, al poner efectivamente un precio a la contaminación y crear un incentivo económico para reducir las emisiones y también pueden apoyar a generar algunas de las grandes sumas necesarias para el desarrollo de resiliencia (UNEP, 2022).

Finalmente, es destacable que durante la reciente Conferencia de las Partes (COP 28) de la CMNUCC en diciembre de 2023, se estableció una colaboración entre las principales asociaciones internacionales de mercados de carbono⁴². Esta iniciativa tiene como objetivo unir esfuerzos para lograr claridad y transparencia en el complejo panorama de los bonos de carbono (Carbon Neutral+, 2023). Un aspecto fundamental de este esfuerzo es que las empresas alineen sus acciones climáticas con el trabajo de organismos de normalización reconocidos internacionalmente, ya que estas entidades ofrecen orientación y procesos de capacitación que resultan muy útiles para estos fines.

3. Banca multilateral

A nivel de banca multilateral, instituciones como el Banco Mundial, el BID y la CAF ofrecen diversas fuentes de financiamiento alineadas con los ODS para ALC. Estas iniciativas están diseñadas para respaldar la reducción de GEI y para apoyar los fondos mencionados en la sección anterior. Un ejemplo innovador en el ámbito del Financiamiento Climático, ofrecido por la CAF y el BID, es la creación de bonos verdes y bonos temáticos centrados en el agua, tema que se analizará más adelante.

a) Banco Mundial

El Banco Mundial presentó en junio de 2021 su nuevo Plan de Acción sobre Cambio Climático, diseñado para proporcionar niveles récord de financiamiento climático a los países en desarrollo. Este plan busca reducir las emisiones de GEI, fortalecer la adaptación y alinear los flujos financieros con los objetivos del Acuerdo de París. Dentro de los sectores apoyados por este financiamiento se encuentra el sector de AyS.

El Grupo Banco Mundial es líder en financiamiento climático para inversiones en países en desarrollo, con una inversión superior a los USD 26.000 millones en el año 2021. Opera como agente fiduciario de 15 iniciativas de financiamiento climático, incluyendo el Fondo del Biocarbono, el Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques, la Asociación para la Preparación de Mercados, así como los fondos de inversión o financiamiento climático, como el CTF y el Fondo Estratégico del Clima. Los recursos se canalizan mediante préstamos con bajo interés, créditos sin intereses y recursos no reembolsables.

Adicionalmente, a través de la Corporación Financiera Internacional IFC, la rama del Banco Mundial que financia al sector privado, se ofrecen opciones de financiamiento para proyectos de infraestructura en el sector de AyS. Sin embargo, esta fuente se dirige a proyectos con un costo estimado mínimo de USD 20 millones, lo que puede restringir su aplicabilidad para organismos operadores de agua y saneamiento de tamaño menor.

⁴² Participan en este esfuerzo colectivo actores clave como VCMI (Voluntary Carbon Market Integrity Initiative), ICVCM (The Integrity Council for the Voluntary Carbon Market), SBTi (Science Based Targets Initiative), CDP, GHG Protocol y la "We Mean Business Coalition".

Recuadro 6**Experiencias de financiamiento del Banco Mundial al sector de AyS en El Salvador**

En abril de 2023, el Banco Mundial aprobó un financiamiento de USD 100 millones para el “Proyecto de Resiliencia del Sector del Agua en El Salvador”. Este proyecto tiene como objetivo mejorar la calidad, confiabilidad y eficiencia de los servicios de abastecimiento de agua en áreas específicas del país y, en caso de emergencias relacionadas con fenómenos naturales, permitirá una respuesta rápida y eficaz.

Las zonas de intervención incluirán el Área Metropolitana de San Salvador, que recibe agua de la planta potabilizadora de Torogoz. Esta área abarca municipalidades como San Salvador, Apopa, Ciudad Delgado, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque y Soyapango. El proyecto tiene como finalidad elevar la calidad, confiabilidad y eficiencia de los servicios de agua mediante la financiación de obras, bienes y servicios que fortalezcan la resiliencia de la infraestructura de abastecimiento de agua. Además, se busca mejorar la prestación de servicios de agua para poblaciones en situación de riesgo en las zonas urbanas y periurbanas de San Salvador.

El financiamiento también respaldará la ejecución de un programa destinado a reducir las pérdidas físicas y comerciales de agua no facturada en la zona de influencia del sistema de abastecimiento de agua de Torogoz, el cual suministra agua a aproximadamente el 40% de la población del Área Metropolitana.

Fuente: Elaboración propia con base en consulta de base de proyectos del Banco Mundial (2024).

En diciembre de 2023, el Banco Mundial anunció su intención de lanzar al menos 15 programas nacionales en los próximos 18 meses, enfocados en la reducción de hasta 10 millones de toneladas de metano. Estos programas se basan en experiencias piloto exitosas en la producción de arroz, operaciones ganaderas y gestión de residuos. En el sector de agua, las intervenciones se dirigirán a reducir los residuos orgánicos en vertederos y gestionar el biogás de manera más eficiente. Se espera que, utilizando las mejores tecnologías disponibles, las emisiones de metano puedan reducirse hasta un 80% en programas centrados en residuos.

El Banco también lanzará dos plataformas de asociación para impulsar medidas aceleradas: la Plataforma Mundial de Reducción del Metano para el Desarrollo (CH₄D), centrada en la disminución del metano en la agricultura y residuos, y la Asociación Mundial para la Reducción de las Quemaduras y el Metano (GFMR), que se enfoca en reducir las fugas de metano en el sector del petróleo y el gas. Ambas plataformas fueron oficialmente presentadas el 4 de diciembre de 2023 durante la Cumbre del Cambio Climático de las Naciones Unidas (COP28) celebrada en Dubái.

b) Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

El BID tiene un marco de acción en el sector de Agua, Saneamiento y Residuos Sólidos en ALC, mediante la movilización de recursos, a partir de los cuales busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible de los servicios de agua y saneamiento para todos (BID, 2024a).

En sus registros históricos, el BID ha movilizado recursos al sector en ALC por USD 28.600 millones, (con garantías soberanas) para la ejecución de 451 proyectos concentrados en Brasil (13%), Argentina (8%), Perú (8%) y Colombia (6%). De este monto, en los últimos 5 años, se han aprobado desembolsos por USD 4.000 millones, destinados a financiar 43 proyectos (BID, 2024a).

Es relevante destacar que el BID se ha propuesto alcanzar metas específicas, como que el 65% de los proyectos aprobados cada año incluyan inversiones en adaptación y mitigación al cambio climático hasta 2023. Además, se espera que el 100% de los proyectos categorizados con alto riesgo incorporen un análisis de riesgo y medidas de resiliencia, junto con la consideración de las contribuciones determinadas a nivel nacional o estrategias de descarbonización a largo plazo en el 100% de las estrategias de país (BID, 2020).

Recuadro 7
Experiencias de financiamiento del BID al sector de AyS en México

En el caso de México, el respaldo se canaliza a través del Gobierno Federal, específicamente la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En los últimos años, el BID ha destinado financiamiento a al menos 17 proyectos en el sector de Agua Potable y Saneamiento en México.

Siete de los proyectos aprobados para México (por USD 680,92 millones) en el periodo de 2017 y 2018 por el BID, están específicamente relacionados con el tema del cambio climático. Estos proyectos abordan diversas temáticas, como la gestión integrada del agua, fuentes renovables de energía, vivienda sustentable, transporte, y planeación, ordenamiento y desarrollo territorial con consideraciones de cambio climático.

Fuente: Elaboración propia con base en consulta a la base de proyectos del BID (2023a).

El BID ha empleado diferentes instrumentos financieros para respaldar proyectos, entre los cuales se incluyen cooperación técnica mediante recursos no reembolsables, préstamos al sector privado, préstamos concesionales, garantías y otros tipos de préstamos. Los recursos asignados por el BID en estos casos provienen principalmente de fondos como el Fondo Chino de Cofinanciamiento para ALC, el CTF, el Capital Ordinario y la Facilidad para Pequeñas Empresas.

Además, el BID se soporta en mecanismos como el AquaFund, que según el BID (2024b) es un fondo gemelo capitalizado con fondos del BID junto con contribuciones de donantes que proporciona financiamiento a actividades dirigidas a las áreas más apremiantes, tales como: i) Acceso al agua y al saneamiento en zonas escasamente pobladas; ii) Seguridad hídrica y cambio climático; iii) Gobierno corporativo de los proveedores de servicios de agua y saneamiento, iv) drenaje urbano y control de inundaciones. Desde su creación, el AquaFund ha apoyado más de 124 iniciativas, influyendo en más de US\$4.100 millones de inversiones del BID en el ámbito del agua y el saneamiento, y ayudando a los gobiernos de la región a lograr el acceso universal a servicios de agua y saneamiento de alta calidad (BID, 2024b).

c) Banco de Desarrollo de América Latina (CAF)

El CAF ha buscado fortalecer la seguridad hídrica de los países de la región bajo un enfoque de gestión integrada de cuencas, mediante la financiación de infraestructura de agua y saneamiento en 10 países, durante los últimos 5 años, por un total de USD1.694 millones, mediante 26 operaciones crediticias (CAF, 2024).

Además del financiamiento de programas y proyectos, CAF ha apoyado a los países de la región con distintos mecanismos de asistencia técnica, capacitación, generación de conocimiento e intercambio de experiencias.

Debe destacarse que entre la infraestructura que ha financiado la CAF, se incluye el desarrollo de 34 PTAR. Como caso emblemático se presenta su participación en el financiamiento del proyecto de saneamiento de la Ciudad y Bahía de Panamá, a través de un crédito de USD 185 millones, para mejorar la calidad ambiental de la Bahía a través del incremento de la capacidad de recolección y tratamiento de aguas residuales.

d) Banco de Desarrollo de América del Norte (NADB)

El NADB (Banco de Desarrollo de América del Norte) proporciona financiamiento para proyectos de infraestructura ambiental y brinda asistencia técnica en la región fronteriza entre México y Estados Unidos, 100 kilómetros a ambos lados, para mejorar el medio ambiente y el bienestar de la población de la zona. Su cartera de financiamiento incluye créditos (recursos reembolsables), el Fondo de Infraestructura Ambiental Fronteriza (BEIF) (recursos no reembolsables) y el Programa de Apoyo a Comunidades (PAC) (recursos no reembolsables). Ofrece diversos tipos de apoyo financiero, como créditos directos, líneas de crédito revolvente y participación en emisiones de bonos municipales. El BEIF financia proyectos

prioritarios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. El PAC brinda financiamiento no reembolsable a proyectos cruciales en poblaciones marginadas, priorizando obras relacionadas con agua potable, aguas residuales, residuos sólidos y conservación de agua.

4. Bonos temáticos

A nivel mundial, entre 2007 y 2019, se emitieron más de US\$754 mil millones en bonos verdes, mientras que en ALC esa cifra fue de solo US\$12,9 mil millones (Grez, Vogt y Cantu, 2023). Los bonos verdes, sociales y azules constituyen instrumentos de deuda que permiten a los inversionistas financiar proyectos con impacto ambiental (en el caso de los verdes), salud oceánica y de fuentes de agua dulce, acceso al agua y saneamiento positivo (en el caso de los azules), y una transición económica justa (en el caso de los bonos sostenibles), siguiendo principios reconocidos internacionalmente (Blanco y otros, 2021; Grez, Vogt y Cantu, 2023).

Para que un bono sea considerado verde, debe cumplir con los Principios de los Bonos Verdes (GBP), directrices voluntarias que orientan al emisor respecto a los componentes necesarios para ser etiquetado como verde (Grez, Vogt y Cantu, 2023). En el caso de los bonos sociales, deben ajustarse a los Principios de los Bonos Sociales (SBP). Para los bonos azules, se alienta a los emisores a utilizar los principios de bonos verdes y sociales de ICMA, adaptados a un uso azul (Blanco y otros, 2021).

Recuadro 8

Experiencia de financiamiento de proyectos de AyS en América Latina y el Caribe a partir de bonos temáticos

Según Grez, Vogt y Cantu (2023), en ALC, las empresas de AyS han realizado hasta ahora 14 emisiones de bonos verdes y sostenibles, incluyendo un emisor en México (Grupo Rotoplas), dos emisores en Chile (Aguas Andinas y Esva) y cuatro emisores en Brasil (Attend Ambiental, Iguá Saneamiento, BRK Ambiental y Corsan).

El bono sostenible de Rotoplas, alineado con los ODS generó una demanda excedentaria de 3,76 veces y fue elogiado por su "Opinión de Segunda Parte" (SPO) como un instrumento sólido, confiable y transparente (íbid).

El bono sostenible de Aguas Andinas también destaca como un caso de éxito, con una reapertura de US \$83 millones y una respuesta favorable por parte de los inversionistas. A través de este instrumento financiero, Aguas Andinas ha respaldado proyectos como el desarrollo de la Planta de Tratamiento de Agua Potable del Chamicero, y la Cogeneración en la Biofactoría Mapocho-Trebal, que logró reducir 17.928 toneladas de emisiones de GEI en 2019 (íbid).

Fuente: Grez, Vogt y Cantu (2023).

Los fondos obtenidos de bonos verdes pueden destinarse a gestión sostenible del agua, energías renovables, adaptación al cambio climático, prevención y control de la contaminación, transporte limpio, entre otros (ICMA, 2021). En la categoría social, se destacan infraestructura básica asequible y acceso a servicios esenciales (Grez, Vogt y Cantu, 2023), mientras que para los bonos azules, se enfocan en la conservación y restauración marina, y desarrollo de infraestructura relacionada con el agua (Blanco y otros, 2021).

Estos bonos temáticos pueden ser emitidos por instituciones privadas, públicas o supranacionales con calificación crediticia atractiva para inversores y una cartera de activos o proyectos verdes, azules o sostenibles (Grez, Vogt y Cantu, 2023).

El proceso que se debe seguir para la estructuración de un bono temático, según Grez, Vogt y Cantu (2023), es el siguiente:

- Diagnóstico de proyectos y selección de indicadores estratégicos.
- Definición de un marco de gestión que incluye i) el uso de fondos, ii) el proceso de selección y evaluación de proyectos, iii) el procedimiento para el seguimiento interno de recursos y iv) los compromisos de divulgación de información.

- Revisión externa o de segunda parte.
- Emisión del bono.
- Proceso de reporte y verificación.

En el marco de los proyectos propuestos en este documento, este mecanismo resulta conveniente para la financiación de proyectos de recuperación de estruivita, que en grandes PTAR de ALC, tiene un costo de inversión que oscila entre los USD 3 y USD 30 millones. Empresas que operen infraestructura de estas características, son más propensas a contar con calificaciones de crédito aceptable para los inversionistas, condición necesaria para acceder al mecanismo. También, pueden contar con mayores capacidades técnicas para demostrar el cumplimiento de los proyectos elegibles, dos aspectos que normalmente se constituyen en barreras para el acceso a estos mecanismos.

C. Otras alternativas de financiamiento

1. Los bancos nacionales de desarrollo

Los bancos nacionales de desarrollo (BND) históricamente han promovido el crecimiento y el desarrollo mundial, mediante el apoyo a las políticas públicas y la aceleración de sus objetivos. Existen cinco funciones que en términos generales, cumplen los BND: proveer financiamiento contra cíclico; fomentar la innovación y la transformación estructural; promover la inclusión financiera; apoyar el financiamiento de infraestructura; y promover la sostenibilidad ambiental, en particular orientada a combatir el cambio climático (Griffith, Netto y Porto, 2021).

Los BND han actuado como conductos entre las inversiones en terreno y el capital nacional, regional e internacional, y han evolucionado en el desarrollo de soluciones financieras para el desarrollo de infraestructura, inversiones que generalmente requieren de plazos más largos, tasas de interés más bajas (o al menos no más altas que las comerciales), perfiles de amortización flexibles y enfoques alternativos de garantía (incluida la financiación con recurso no limitado) (Griffith, Netto y Porto, 2021).

La región de ALC tiene 72 BND activos en 19 países. En 2014, los activos de este grupo de BND valían 1.700 miles de millones de dólares y representaban el 29 por ciento del producto interno bruto (PIB) de la región de ALC (Netto, y otros, 2021). La cartera crediticia total de los BND en ALC está valorada en 964 mil millones de dólares (ALIDE, 2018); y de acuerdo con la CEPAL, se estima que los BND de ALC han comprometido hasta febrero de 2021, el equivalente a US\$90 mil millones en apoyo financiero orientado a apoyar a paliar los efectos del COVID-19 en la región (Griffith, Netto y Porto, 2021).

De acuerdo con el BID (2023b) los BND fueron la segunda fuente de financiación de proyectos de infraestructura desarrollados bajo esquemas de Project Finance entre el 2004 y el 2021, con una participación del 20,5%. 26 entidades en 10 países participaron en la financiación privada de infraestructura bajo el esquema de Project Finance, y Agua y energía, con una contribución del 24,4% y 23,7%, respectivamente, fueron los sectores que tuvieron mayor inversión de BND para el mismo periodo.

2. Fondos revolventes

Muchos países de la región, como el Estado Plurinacional de Bolivia, Colombia, Ecuador, Honduras y Perú tienen numerosos prestadores de tamaño medio (que atienden menos de 100.000 habitantes)⁴³ y pequeño (que atienden menos de 10.000 suscriptores), cuyos incrementos en cobertura son determinantes para el logro de las metas de los ODS6 en cada uno de esos países.

Con el fin de apoyar la gestión de esos prestadores e incluso de sus grandes prestadores, la mayoría de los países de la región asignan cada año en sus presupuestos recursos no reembolsables con destino a inversiones en agua y saneamiento.

⁴³ Siguiendo a Lentini (2015) la presencia de economías de escala crecientes (costos medios decrecientes) en el caso de prestadores que atienden desde 100.000 hasta 1.000.000 de habitantes.

Estos recursos, suelen tener un importante impacto en los pocos prestadores que los reciben y en las comunidades beneficiarias, pero son muy limitados respecto a la demanda existente, dejando por lo tanto muchas otras comunidades, tanto dentro de los municipios beneficiados como de todos los municipios no beneficiarios sin atención.

Adicionalmente, al ser recursos no reembolsables en su totalidad realmente no exige mayor esfuerzo en mejora de la gestión por parte de los prestadores beneficiarios. Si bien es cierto que en algunos países —como Colombia y Perú— se exige, como parte del proceso de entrega del aporte estatal no reembolsable la definición de programas de fortalecimiento, estos se quedan en papel, puesto que al no tener ningún compromiso formal de reintegro —así sea parcial de los recursos— los prestadores no tienen incentivos para realmente mejorar su gestión.

Esta plenamente identificado en la literatura que la exigencia de dividendos cuando los socios de las empresas tienen real control de las empresas, es un fuerte incentivo a la mejor eficiencia de la gestión realizada por el equipo de gerencia a cargo de la dirección de la empresa (Prowse, 1992; Agrawal y Knoeber, 1996).

Igualmente se ha identificado que en ausencia de socios que realicen esa tarea o cuando estos no tienen la capacidad (o incentivos) de realizar esa exigencia —como puede ser la situación de muchas empresas de propiedad pública—, el endeudamiento puede ser un instrumento útil y conveniente para lograr ese mismo incentivo a la eficiencia en la gestión (Baker y Wruck, 1989). En este caso el ente financiero, en su interés de garantizar el pago de intereses y capital realiza supervisión y presión sobre la dirección empresarial para una adecuada gestión financiera.

Recuadro 9 **Fondo revolvente de agua en Filipinas**

En Filipinas, la financiación del sector de agua y saneamiento ha dependido históricamente de una combinación de fondos internacionales de desarrollo, recursos públicos nacionales e ingresos generados por la recaudación de facturas. Sin embargo, en la década de 1990, estos fondos resultaron insuficientes para cubrir los costos de inversión en infraestructura, lo que condujo a un interés creciente en movilizar financiamiento del sector privado (Banco Mundial, 2016).

Este cambio de enfoque dio lugar al inicio de reformas legales y regulatorias destinadas a facilitar la movilización de financiamiento interno. Se implementó un sistema para clasificar a los proveedores de servicios de agua según su solvencia, con la expectativa de que aquellos considerados solventes se apartaran del financiamiento gubernamental y buscaran fuentes de financiación en el mercado. Sin embargo, en ese momento, los préstamos de los bancos privados a las empresas de agua eran escasos, ya que los bancos locales no estaban familiarizados con las empresas de servicios públicos y las percibían como débiles e ineficientes (Banco Mundial, 2016; DAI, 2024).

Para abordar estos desafíos, se creó en 2008 el Fondo Rotatorio de Agua de Filipinas con el objetivo de movilizar financiamiento comercial interno adicional para los servicios públicos de agua. Operaba como un mecanismo de cofinanciamiento, facilitando el financiamiento institucional privado para respaldar proyectos municipales de agua y aguas residuales. Además, implementó dos componentes clave para facilitar el acceso al mercado financiero: un sistema de calificación crediticia para informar a los inversores y un programa de capacitación en evaluación de proyectos hídricos para desarrollar la capacidad de prestamistas con poca experiencia en inversiones en el sector hídrico (Banco Mundial, 2016).

El fondo proporcionaba préstamos concesionales inicialmente provenientes de la cooperación internacional, combinándolos con fondos de bancos comerciales privados nacionales para apoyar proyectos hídricos. En promedio, el índice de financiamiento se situaba entre el 50 y el 75 por ciento de la banca de desarrollo y entre el 25 y el 50 por ciento de prestamistas privados. Este mecanismo permitió superar la barrera comúnmente enfrentada por las empresas del sector: la obtención de créditos a plazos inferiores a 10 años (Banco Mundial, 2016).

Desde su creación hasta 2014, el PWRF canalizó con éxito más de 234 millones de dólares en préstamos para 21 proyectos de agua y saneamiento, de los cuales aproximadamente el 60 por ciento provino de bancos privados. Se estima que seis millones de personas se han beneficiado del acceso nuevo o mejorado al agua corriente, según datos proporcionados por el Banco Mundial en 2016 (Banco Mundial, 2016).

Fuente: (Banco Mundial 2016; DAI, 2024).

Si bien es cierto que los alcaldes y/o gerentes de las empresas de servicios públicos preferirán tener acceso a los recursos no reembolsables ofrecidos por el Gobierno Nacional en lugar de recursos de créditos que puedan brindarles los intermediarios financieros privados, también es cierto que esta preferencia se contrapone al deseo de cualquier dirigente político de garantizar que obtendrá los recursos para llevar adelante las obras durante su período de gobierno. Es decir, si bien prefieren los recursos no reembolsables, la incertidumbre sobre estos hace que los recursos de crédito se presenten como un sustituto conveniente.

Sin embargo, es ampliamente reconocido que los intermediarios financieros privados tienden a mostrar una reticencia considerable cuando se trata de otorgar créditos a municipios y prestadores de servicios públicos de tamaño mediano o pequeño, lo que ha configurado en un déficit de financiamiento en el sector (Johannessen, y otros, 2014).

Tomando en cuenta este marco, se identifica que la entrega de los recursos del Estado en forma de créditos parcialmente reembolsables a los municipios y/o prestadores locales de los servicios de agua y saneamiento, además de los incentivos positivos sobre la gestión del prestador, puede servir como un multiplicador sustentable de los recursos no reembolsables aportados por el Estado al sector.

Este mecanismo no es enteramente novedoso, pues se basa en los Revolving Funds utilizados en los Estados Unidos durante más de dos décadas, con ajustes para la implementación en ALC. En términos generales, el mecanismo implica:

- El gobierno nacional entrega los recursos a aportar anualmente al Fondo Revolvente, el cual será administrado (como patrimonio autónomo) por una entidad nacional pública (o privada). En principio, podrían utilizarse para este fin a los Bancos Nacionales de Desarrollo existentes en varios países de la región.
- Además de los aportes del gobierno, el Fondo Revolvente se alimentará con el repago que realicen los municipios/prestadores beneficiarios de los créditos otorgados por el Fondo, y por créditos del mercado financiero (nacional/internacional) que el fondo obtenga para multiplicar su capacidad.
- El gobierno define los mecanismos concursales de asignación de recursos, los plazos (largos) de repago, las tasas de interés de referencia y los subsidios (porcentajes de descuento en las tasas y en el monto reembolsable) aplicables en función de las condiciones de los municipios/prestadores/comunidades beneficiarias.
- Una parte de los recursos del Fondo Revolvente se utilizarán para brindar asistencia técnica los municipios/prestadores/comunidades beneficiarias en la preparación de sus solicitudes y en la definición de los planes de fortalecimiento de su gestión.
- Se debe establecer un esquema de créditos crecientes/reiterativos a los beneficiarios en función de la mejora en la gestión/logro de resultados.
- Al entregarse como recursos no reembolsables solamente una proporción del aporte del gobierno, el Fondo Revolvente será un mecanismo de financiamiento creciente de financiamiento al sector que podrá aumentar significativamente su cobertura regional en una proporción no alcanzable por el mecanismo vigente de dedicar la totalidad del presupuesto como recursos no reembolsables.
- Al tomar recursos del mercado local para financiarse, el Fondo Revolvente aumentará significativamente la participación del sistema crediticio en el financiamiento del sector de agua potable y saneamiento.
- En la medida que se consolide la capacidad de obtención de crédito por los municipios y prestadores, los subsidios que entrega el Fondo a la tasa de interés y/o al pago del capital podrá extenderse a los créditos otorgados por la banca comercial, dinamizando aún más el mercado crediticio del sector.

Sería beneficioso que los gobiernos establezcan un monto anual mínimo para el Fondo Revolvente, permitiendo una planificación a largo plazo y la obtención de créditos externos para multiplicar su capacidad crediticia.

Finalmente, a pesar de los beneficios potenciales que este mecanismo puede ofrecer, se reconoce que habrá municipios/prestadores más débiles que requerirán otros mecanismos para su desarrollo o consolidación.

3. Fondo Azure

Azure es una iniciativa relativamente nueva –inició operaciones en 2018– de Catholic Relief Services (CRS) que moviliza de manera integrada financiamiento combinado ('blended finance') y servicios de asistencia técnica para los operadores de sistemas de agua y saneamiento con el fin de apoyar su sostenibilidad y mejorar los servicios de las comunidades rurales y periurbanas en Centroamérica (Catholic Relief Services, 2024).

Azure Source Capital (ASC) proporciona capital, a través del fideicomiso FIDEAGUA, a instituciones financieras locales (bancos rurales y cooperativas de crédito) para que lo presten a operadores de servicios de agua a tasas de interés competitivas. FIDEAGUA está capitalizada por Catholic Relief Services, el BID y otros inversionistas de impacto social (íbid).

A la fecha, Azure ha beneficiado 322 proveedores de AyS con asistencia técnica. Los resultados clave de los servicios técnicos de Azure son: i) El fortalecimiento de las capacidades de gestión de las operadoras de agua, ii) El respaldo social de los proyectos de mejora y iii) la producción de estudios de ingeniería, diseños y estimaciones de costos que respaldan las solicitudes de préstamos (Catholic Relief Services, 2024).

El desembolso total de Azure para operadores del sector de AyS en Centroamérica ha sido, hasta diciembre del 2022, de USD 7,4 millones, en cerca de 30 operaciones dirigidas principalmente a la compra de equipos para adecuación de redes de acueducto, alcantarillado y plantas de potabilización. Su financiamiento ha beneficiado a más de 60 mil hogares, y ha desembocado en el desarrollo de 4.739 nuevas conexiones de agua.

En el caso de El Salvador, Azure ha aprobado 13 préstamos con montos entre USD 170.000 y USD 300.000; montos cercanos a los requeridos para ejecutar proyectos de aprovechamiento energético del metano, en las PTAR evaluadas en México y El Salvador, por lo que se rescata esta iniciativa como una fuente con un alto potencial para el financiamiento de proyectos de este tipo en Centroamérica. De hecho, debe anotarse que el fondo ha expresado interés preliminar en analizar la posibilidad de apoyar las inversiones en recuperación de metano evaluadas por CEPAL para una PTAR en El Salvador.

D. Barreras y recomendaciones para el financiamiento de proyectos de economía circular en el sector de AyS en América Latina y el Caribe

Aunque el desarrollo de regulaciones ambientales resulta crucial para fomentar inversiones en la reducción de metano, muchos países en desarrollo dependen del apoyo financiero internacional para superar las barreras que obstaculizan la participación del sector privado (CATF, 2023). A pesar de que se reconoce el significativo potencial de contribución del metano al calentamiento global, el respaldo financiero destinado a sectores enfocados en su reducción ha sido limitado (con un promedio cercano a los USD 5.000 millones por año), representa menos del 2 % del financiamiento climático mundial (Banco Mundial, 2023b), evidenciando una preocupante falta de prioridad para la reducción del metano. Esta limitación persiste a pesar de la existencia de diversas fuentes internacionales de financiamiento, generando obstáculos para alcanzar metas ambientales globales relacionadas con la reducción de emisiones de metano.

Las barreras para acceder al financiamiento climático son diversas. Desde el lado de la oferta, se destaca la falta de interés de los donantes en la mitigación del metano, la baja priorización en los objetivos climáticos financiados y la falta de alineación del metano con las áreas de financiamiento de

entidades como la Banca Multilateral. Desde el lado de la demanda, factores como la falta de solicitudes de financiamiento para proyectos de mitigación de metano, la ausencia de incentivos financieros y la complejidad para formular proyectos específicos son obstáculos estructurales.

A pesar de que la inversión en energías renovables recibió 26 veces más financiamiento que las acciones de reducción del metano entre 2019 y 2020, se destaca que los beneficios potenciales de la reducción del metano son similares o mayores en magnitud que los beneficios de la inversión en energías renovables y en transporte de bajas emisiones. Sin embargo, los fondos asignados al metano son entre 12 y 26 veces menores.

1. Construcción de capacidades para acceder a fondos climáticos

El acceder a financiamiento climático, puede configurar un reto cuando se trata de prestadores medianos y pequeños que no cuentan con las capacidades institucionales para acceder a estas fuentes de financiamiento. En ese orden de ideas, se destaca la necesidad de fortalecer las capacidades institucionales para acceder a fuentes de financiamiento climático, considerando la formación de Asociaciones Público-Privadas o la agrupación de organismos operadores de agua en zonas metropolitanas. Se recomienda programas de capacitación dirigidos a estos organismos para mejorar su acceso a fuentes de financiamiento alternativas y explorar opciones para superar restricciones normativas.

Por ejemplo, el análisis de los costos incrementales es fundamental para que el GCF pueda determinar si se justifica el apoyo a un determinado proyecto. Este análisis de costos incrementales requiere de capacidades institucionales para proyectar los costos y beneficios de la intervención propuesta durante su vida económica estimada. Cada análisis económico presentado al GCF debe considerar el pronóstico de tres escenarios: i) el escenario contrafactual que existiría sin el proyecto, ii) el escenario del proyecto, en el cual el proyecto se implementa con consideraciones climáticas, y iii) el escenario de referencia del proyecto, en el que se implementa un proyecto similar sin consideraciones climáticas (GCF, 2018).

La aplicación de metodologías para estimación de los costos incrementales y de los costos totales asociados con las emisiones de GEI, constituyen el soporte para que las AE (entidades acreditadas) y el GCF, en desarrollo de las propuestas de financiación, puedan determinar tres elementos principales: i) el costo del proyecto, ii) la porción que debe ser financiada por el GCF, y iii) los instrumentos y el nivel de concesionalidad que el GCF debe emplear financiar su aporte respecto de los costos⁴⁴. Como resultado de este análisis, se tendrá un acuerdo entre el GCF y las AE sobre el componente o parte del proyecto que es elegible para ser financiada por el GCF y que componente o acciones son más adecuadas para el cofinanciamiento (Ministerio del Ambiente - Ecuador, 2019).

Además, con la priorización en la asignación de recursos, que con el GEF-8 se ha otorgado a la protección de la biodiversidad, se hace necesario fortalecer las capacidades para demostrar los impactos que sobre la biodiversidad acuática, tiene el desarrollo de inversiones que permitan incrementar los niveles de remoción de N y P. Incrementar la evidencia del impacto de este tipo de inversiones, permitirá al sector, una mayor participación en las carteras de financiamiento climático.

2. Formulación de Proyectos para el GCF y el GEF

Se propone la elaboración de proyectos centrados en el aprovechamiento energético del metano y la recuperación de nutrientes, priorizando Notas Conceptuales. Este enfoque busca financiar un conjunto más amplio de proyectos en PTAR municipales. La diversificación de proyectos permitirá explorar opciones de apalancamiento de inversiones, involucrando fondos nacionales, federales y otras fuentes como la Banca Multilateral. Cumplir con los criterios de eficiencia y efectividad del GCF es clave, resaltando que un mayor apalancamiento potenciará el impacto y la eficiencia de los recursos.

⁴⁴ La política de cofinanciamiento del GCF detalla cómo se deben clasificar y reportar estos costos.

Esta propuesta sería histórica para México, marcando la primera vez que se accede a fondos internacionales de financiamiento climático para el sector de AyS, específicamente para el aprovechamiento de metano en PTAR municipales de menor capacidad. El alineamiento con el Programa País de México para el GCF en 2023 y las metas del Compromiso Global de Metano (GMP) refuerzan su relevancia. Se recomienda liderar la formulación del proyecto en colaboración entre CONAGUA, una Entidad Acreditada (EA) de la banca multilateral o el PNUD, con validación del INECC y aprobación de SEMARNAT como Autoridad Nacional Designada (DNA).

Por otro lado, ante posibles limitaciones en países más pequeños como El Salvador y Panamá, se recomienda considerar un proyecto regional que incluya al menos las PTAR de estos países y posiblemente otras de Centroamérica. Esto crearía un portafolio de proyectos más significativo, aumentando la viabilidad de financiamiento por parte del GCF. La recomendación implica consultas con entidades de la Banca Multilateral presentes en la región, como el BID, Banco Mundial o CAF.

3. Aprovechar posibilidades del financiamiento combinado para movilizar capital privado

La dependencia excesiva de condiciones concesionales puede hacer que los proyectos no sean sostenibles sin estos aportes a lo largo del ciclo económico, desincentivando la financiación del mercado. Los préstamos concesionales reducen el costo del capital y el riesgo financiero, pero los proyectos deben aspirar a ser financieramente sostenibles bajo condiciones más favorables que las del mercado.

Las iniciativas de financiación combinada buscan utilizar diversos instrumentos financieros para respaldar inversiones en proyectos de economía circular en gestión del agua y saneamiento, como el aprovechamiento energético del metano y la recuperación de nutrientes. El FC parcial de un proyecto, al ofrecer una parte del préstamo a una tasa de interés más baja, reduce la carga financiera para el prestatario, mejora el acceso a la financiación de la banca comercial y reduce riesgos, siendo especialmente útil en situaciones de falta de transparencia o información.

Aunque las garantías son comunes a nivel mundial para movilizar financiación privada en el sector de AyS, no necesariamente son la mejor opción, y la elección del instrumento debe considerar la etapa del proyecto, el potencial de generación de ingresos y asignación de riesgos. Los préstamos concesionales, aplicados por fondos internacionales como el GCF y el GEF, combinan financiamiento comercial con condiciones concesionales. La asistencia técnica, en forma de donaciones para preparación de proyectos, puede fortalecer capacidades, transferir conocimientos y estructurar proyectos, haciendo las condiciones de financiación más atractivas.

Las políticas de fondos como el GCF han aplicado principios como la maximización del apalancamiento y han establecido límites de subvención, aunque con análisis de casos individuales. En 2022, el GCF operaba con un enfoque caso por caso, sin un conjunto estándar de condiciones para préstamos al sector público. En 2019, se aprobó una política de cofinanciación que establece requisitos de reporte para proyectos que involucran cofinanciación.

4. Fondos revolventes: una solución multiplicadora de financiamiento sectorial

Finalmente, la implementación de un Fondo Revolvente para el financiamiento de proyectos de agua y saneamiento en ALC presenta un enfoque innovador y sostenible, aprovechando la eficacia potencial de créditos parcialmente reembolsables.

Este mecanismo, inspirado en exitosos modelos como los Revolving Funds en los Estados Unidos, permite superar las limitaciones de recursos estatales al actuar como un multiplicador sostenible de inversiones. La adopción de este mecanismo permitiría aprovechar a gran escala, los beneficios que ofrecen los esquemas de financiamiento combinado. Por ejemplo, un fondo de revolvente, administrado por un BND, podría tanto acceder a créditos de la banca comercial; financiamiento de la banca multilateral, y recursos del mercado de capitales, mediante la emisión de bonos verdes, sociales o azules.

La combinación de este financiamiento, con los aportes gubernamentales y los repagos de municipios y operadores, permitiría ampliar significativamente la capacidad crediticia del sector, así como permitiría mayor simetría en la información, reduciendo el riesgo percibido de la banca comercial hacia el financiamiento del sector. Además, se fomentaría la eficiencia en la gestión y promoviendo la participación del sistema crediticio. Este mecanismo ha demostrado funcionar de manera exitosa en Filipinas, y en El Salvador, con FIDEAGUA, capitalizado a través del Fondo Azure.

V. Conclusiones

Este documento se ha centrado en evaluar las oportunidades y proponer una hoja de ruta técnica y financiera para la implementación de proyectos de economía circular en el tratamiento de aguas residuales, específicamente, asociados al aprovechamiento energético del metano, y a la recuperación de N y P mediante la precipitación de estruvita, destacándolos como opciones que las autoridades pertinentes podrían considerar como posibles catalizadores para alcanzar el ODS6.

A continuación, se presentan de manera resumida las conclusiones clave obtenidas a partir de este análisis, así como una serie de recomendaciones para hacer frente a las barreras que pueden suponer obstáculos para la materialización de estos proyectos.

A. Aprovechamiento energético del metano: oportunidades rentables en PTAR de pequeña y mediana escala

Este documento ofrece evidencia sobre la viabilidad financiera del aprovechamiento energético del metano en siete PTAR en México y El Salvador, todas con capacidades inferiores a 500 l/s. Los resultados indican que la inversión de USD 5,37 millones permitiría generar 8.077 MWh/año de energía eléctrica, con ahorros anuales de USD 1,35 millones. Estos ahorros permitirán recuperar la inversión en un plazo de 5,48 años.

Es importante destacar que estos resultados podrían mejorar con el crecimiento de conexiones de alcantarillado debido al desarrollo urbanístico y al crecimiento natural de la población. Por lo tanto, se enfatiza la necesidad de acompañar las inversiones en aprovechamiento energético del metano con el desarrollo de la infraestructura de alcantarillado para maximizar el potencial de los proyectos.

En términos de beneficios ambientales y sociales, se registra una reducción de emisiones significativa, alcanzando 4.810 toneladas de CO₂ equivalente en El Salvador y 407,6 toneladas en México. Sin embargo, se reconoce que los resultados pueden variar según factores como el consumo energético real, niveles de operación y emisiones no determinadas asociadas con procesos en las PTAR.

Finalmente, se estima que la inversión de USD 5,37 millones generaría un aumento del valor agregado en USD 5,01 millones y la creación de 290 empleos directos e indirectos. Este documento contribuye a la literatura al evidenciar la rentabilidad de adoptar el enfoque de economía circular en

plantas de tratamiento de aguas residuales, incluso con capacidades inferiores a 500 l/s, alineándose con múltiples ODS, como el 6, 7 y 8. Este enfoque establece un círculo virtuoso, liberando recursos para inversiones en línea con los ODS.

B. Oportunidades de recuperación de nutrientes: perspectivas actuales y futuras

En ALC, la utilización de biosólidos provenientes de PTAR como fertilizantes ha demostrado ser económicamente viable. Este enfoque no solo reduce los costos asociados al transporte y disposición en vertederos, lo cual es crucial para las empresas de saneamiento, sino que también contribuye a prolongar la vida útil de dichos vertederos. En la región, se observa un aumento en el uso agrícola de biosólidos respaldado por su viabilidad económica y regulaciones que permiten diversos usos, siempre que se cumplan con estándares de calidad y restricciones sobre la acumulación de metales en el suelo. A pesar de que algunas empresas de saneamiento analizan la composición de sus biosólidos y buscan posibles usuarios, enfrentan resistencia por parte de algunos agricultores. Estrategias para aumentar la demanda incluyen campañas de divulgación dirigidas a asociaciones de agricultores y servicios de jardinería de municipalidades cercanas a las PTAR. También se destaca la efectividad de combinar biosólidos con otros residuos orgánicos y someterlos a compostaje para generar un abono orgánico mejorado.

Por otro lado, a nivel global, las normativas ambientales son cada vez más estrictas respecto a las concentraciones de N y P en los efluentes descargados a cuerpos de agua, especialmente en Norteamérica y Europa. Este endurecimiento normativo, ha permitido observar, a través de cambios regulatorios, se estimula la innovación y la implementación de proyectos como la precipitación de sales fosfatadas, específicamente la estruvita. Estas iniciativas, que previamente no eran consideradas y no generaban beneficios económicos, ahora se han vuelto rentables.

En ALC, aunque en la mayoría de los países de la región las normativas actuales no exigen la remoción de nutrientes en las PTAR, se observan pasos incipientes hacia normativas más estrictas en algunos países, como México y Guatemala (Panamá presenta una excepción con regulaciones que de hecho, se han vuelto menos restrictivas). Además, algunos proyectos de PTAR en fase de planificación (PTAR de Aguilares en San Salvador y PTAR Canoas en Bogotá) consideran tratamientos para la remoción de nutrientes, y algunas ya en operación (PTAR La Farfana en Santiago de Chile) incorporan sistemas avanzados, como el ANNAMOX.

La posibilidad de un endurecimiento futuro en las normativas podría llevar a las PTAR en ALC a implementar soluciones innovadoras, como la precipitación de estruvita para la remoción de nutrientes. A este respecto, es relevante señalar que este documento evidenció que la recuperación de estruvita solo sería económicamente viable en caso de futuros endurecimientos normativos que restrinjan las concentraciones de P en los efluentes de las PTAR, a un máximo de entre 4 mg/l y 5 mg/l, situación que aún no se ha materializado en ALC.

En cuanto a las aplicaciones prácticas, la precipitación de estruvita se presenta como una tecnología idónea para PTAR de lodos activados con remoción biológica de P y digestión anaeróbica de lodos. Estos sistemas ofrecen beneficios económicos, como la reducción en el consumo de cloruro férrico, dependiendo de la necesidad impuesta por las normativas actuales de controlar la concentración de P en el efluente descargado.

C. Alternativas para el financiamiento de proyectos de economía circular en el sector de AyS en América Latina y el Caribe

El sector de AyS enfrenta diversas barreras para acceder a financiamiento privado. La percepción de riesgo, derivada de la falta de transparencia y la limitada capacidad para generar ingresos mediante tarifas, junto con la insuficiente cultura de pago por los servicios de AyS en buena parte de la región; y la disparidad entre los plazos de otorgamiento de crédito comercial y la recuperación de los costos de inversión, constituyen obstáculos significativos. Esta situación ha restringido considerablemente el flujo de financiamiento hacia el sector, representando apenas el 6% de las inversiones totales en saneamiento y suministro de agua OCDE, 2022).

Aunque el financiamiento climático se configura en una alternativa para el sector, se han identificado barreras para su acceso. Por ejemplo, el CTF no considera al sector de agua y saneamiento dentro de su foco de operación, y aunque se podría acceder para proyectos relacionados con "energías renovables", como el aprovechamiento energético del metano, la financiación destinada a la reducción de emisiones de metano es mínima, representando menos del 2% del financiamiento climático mundial (Banco Mundial, 2023b).

Ahora bien, para que estos proyectos sean financiados, se proponen diversas alternativas. En primer lugar, se sugiere considerar la posibilidad de agregar proyectos de aprovechamiento energético del metano en PTAR intermedias a nivel nacional y supranacional (en el caso de países de Centroamérica). Esto permitiría formular proyectos a una escala, en la que puedan ser financiados por el CTF y el GCF, si se considera que la aprobación promedio por proyecto, asciende a USD 34 y USD 80 millones, respectivamente.

Adicional a lo anterior, se debería considerar la postulación del desarrollo de estos proyectos ante la ventanilla de preparación del GCF, que ofrece financiamiento desde las etapas iniciales hasta las fases finales del proyecto, incluyendo el apoyo para las debidas diligencias y la estructuración final.

Si se considera por otro lado, la postulación de estos proyectos ante el GEF, debe anotarse que este fondo suele otorgar financiamiento por montos más bajos que el CTF y el GCF, por lo que se podrían formular proyectos de forma independiente, por operador, sin necesidad de recurrir a la agregación de proyectos, tanto para la recuperación de nutrientes como para el aprovechamiento energético del metano. A su vez, con la priorización de la biodiversidad por parte del GEF-8, se vislumbran oportunidades importantes para la presentación de proyectos de recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita, especialmente en PTAR con capacidades superiores a los 3.000 l/s.

Finalmente, a nivel general, se considera que existen amplias oportunidades para la movilización de recursos mediante fondos revolventes a nivel nacional. Esto permitiría aprovechar las ventajas del financiamiento combinado, multiplicando la capacidad de inversión del sector y reduciendo las asimetrías de información y el riesgo percibido por la banca comercial. Ejemplos exitosos de este enfoque incluyen el Fondo Revolvente para el Agua en Filipinas y FIDEAGUA en El Salvador. Se considera que la proliferación de este mecanismo en la región permitiría avanzar en el establecimiento de reglas claras para que el capital privado pueda sumarse al capital público para invertir en agua, y así, avanzar en el cumplimiento del ODS6 al 2030.

Bibliografía

- Agrawal, A., & Knoeber, C. R. (1996), Firm performance and mechanisms to control agency problems between managers and shareholders. *Journal of financial and quantitative analysis*, 31(3), 377-397.
- Agrokasa. (2020), *Uso del Agua Residual tratada en Agrokasa*. Presentación del proyecto.
- Aguas Andinas. (s.f.). *Aguas Andinas*. Obtenido de Aguas Andinas: <https://sustentabilidad.aguasandinas.cl/econom%C3%ADa-circular>.
- Aguilar, I., & Blanco, P. (2018), Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 86-114. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>.
- ALIDE (2018), *50 Years: Past, Present and Future (50 años: Pasado, Presente & Futuro)*. San Isidro, Peru: Latin American Association of Development Financing Institutions. Obtenido de <http://www.alide.org.pe/wp-content/uploads/2018/06/Libro-50-A%C3%B1os-ALIDE-Pasado-Presente-Futuro-1.pdf>.
- ANDA (2022), *PTAR San Juan Opico, La Libertad*. San Salvador, El Salvador: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Baker, G. P., & Wruck, K. H. (1989), Organizational changes and value creation in leveraged buyouts: The case of the OM Scott & Sons Company. *Journal of Financial Economics* caso de OM Scott & Sons Company. *Journal of Financial Economics*, 25(2), 163-190.
- Banco Mundial. (2024), *Banco Mundial: Proyectos y operaciones*. Obtenido de <https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/projects-home>.
- _____. (2023a), *El Banco Mundial intensifica sus esfuerzos para abordar las emisiones de metano*. Banco Mundial. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/factsheet/2023/12/04/world-bank-steps-up-efforts-to-address-methane-emissions>.
- _____. (2023b), *Bending the Curve: A Triple-Win Blueprint for Global Methane Reduction*.
- _____. (2023c), *Fertilizer consumption (% of fertilizer production) - Latin America & Caribbean s [Conjunto de datos]*. Obtenido de <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.PT.ZS?end=2020&locations=ZJ&start=1961&view=map>.
- _____. (2016), *Water Revolving Fund in the Philippines*. Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/651521472032148001/pdf/107979-BRI-P159188-BlendedFinanceCasesPhilippines-PUBLIC.pdf>.
- Basani, M. (2023), *Israel: ¿Cómo la innovación en agua y saneamiento puede lograr objetivos nacionales estratégicos?* BID. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/agua/es/israel-como-la-innovacion-en-agua-y-saneamiento-puede-lograr-objetivos-nacionales-estrategicos/#:~:text=Reutilizaci%C3%B3n%20del%20agua.&text=Esto%20gener%C3%B3%20la%20necesidad%20del,%C3%ADder%20mundial%20en%20agua%20reuti>.

- BID (2024a), *BID*. Obtenido de BID: <https://www.iadb.org/es/quienes-somos/tematicas/agua-y-saneamiento>.
- ____ (2024b), *BID-Aquafund*. Obtenido de BID-Aquafund: <https://www.iadb.org/es/quienes-somos/tematicas/agua-y-saneamiento/iniciativas-de-agua-y-saneamiento/aquafund>.
- ____ (2023a), *¿Qué impacto creamos?* Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de *¿Qué impacto creamos?*: <https://www.iadb.org/es/project-search>.
- ____ (2023b), *Nuevo estudio del BID destaca rol de Banca Pública para movilizar capital privado hacia proyectos de infraestructura*. Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <https://www.iadb.org/es/noticias/nuevo-estudio-del-bid-destaca-rol-de-banca-publica-para-movilizar-capital-privado-hacia>.
- ____ (2020), *Grupo BID fija financiamiento climático en un mínimo anual del 30% hasta 2023*. Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de Grupo BID fija financiamiento climático en un mínimo anual del 30% hasta 2023: <https://www.iadb.org/es/noticias/grupo-bid-fija-financiamiento-climatico-en-un-minimo-anual-del-30-hasta-2023>.
- ____ (2018a), *El papel central del financiamiento en el Acuerdo de París y las oportunidades para los bancos nacionales de desarrollo*.
- ____ (2018b), *Financing the Future with the IDB Group*. publications.iadb.org. Obtenido de https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Financing_the_Futureen.pdf.
- Biwater . (2016), *Proyecto de aguas residuales de El Salvador, Propuesta del Contratista*. Biwater International Limited.
- Blanco, M., Currey, M., Johnson, S., & Samtani, M. (2021), *Cinco cosas que deberías saber sobre los bonos azules*. BID. Obtenido de <https://idbinvest.org/es/blog/impacto-en-el-desarrollo/cinco-cosas-que-deberias-saber-sobre-los-bonos-azules>.
- Brichetti, J. P., Mastronardi, L., Rivas, M. E., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021), *La brecha de infraestructura en América Latina y el Caribe: estimación de las necesidades de inversión hasta 2030 para progresar hacia el cumplimiento de los Objetivos de*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- CAF (26 de 1 de 2024), *CAF-Agua y saneamiento*. Obtenido de CAF-Agua y saneamiento: <https://www.caf.com/es/especiales/impacto-caf/areas-de-accion/agua-y-saneamiento/>.
- CAPA (2022), *Plantas de tratamiento de aguas residuales*. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, Estado Quintana Roo.
- Carbon Neutral+*. (13 de Diciembre de 2023), Obtenido de <https://www.carbonneutralplus.com/un-resumen-de-la-cop-28/>.
- CATF (2023), *Barriers and Solutions to Scaling-up Methane Finance*. Clean Air Task Force.
- Catholic Relief Services. (26 de 01 de 2024), *AZURE*. Obtenido de *AZURE*: <https://ics.crs.org/project/azure>.
- CDM (2024a), *Clean Development Mechanism: Activity search*. Clean Development Mechanism. Obtenido de Clean Development Mechanism: Activity search: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>.
- ____ (2024b), *CDM: Activity search*. Clean Development Mechanism. Obtenido de <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/RINA1228922788.48/view>.
- CDM Smith & INGESAM. (2014), *PTAR Canoas: Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas*.
- CE (2023), *Methane emissions*. Comisión Europea. Obtenido de https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/methane-emissions_en.
- ____ (2022), *Implementation Report of the Sewage Sludge Directive 86/278/EEC*. Comisión Europea, Directóριο General de Ambiente.
- CEE (1991), *Consejo directivo sobre la protección de aguas contra la polución causada por nitratos de fuentes agrícolas*. Bruselas: Comunidad Económica Europea.
- Centrisys-CNP. (2023), *Denver, Colorado has the World's Largest Struvite Recovery System from Digestate*. Centrisys-CNP Centrifuge-Systems, LLC [en línea]. Obtenido de <https://centrisys-cnp.wistia.com/medias/ow27u7mdzg>.
- ____ (2022a), *PROCESS: MagPrex™ Installations*. PMI2022v1EN, Centrisys-CNP Centrifuge-Systems, LLC. Kenosha, WI.
- ____ (2022b), *MagPrex™: Struvite Removal for Municipal and Industrial Applications*. Centrisys-CNP Centrifuge-Systems, LLC.
- CEPAL (2023), *América Latina y el Caribe en la mitad del camino hacia 2030: Avances y propuestas de aceleración. Sexto informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*. Santiago. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/886ce614-437a-431f-bd64-b19b7f8e6bog/content>.

- CEPAL (2020), *Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad. Trigésimo octavo período de sesiones de la CEPAL*. Santiago: Comisión Económica Para América Latina y el Caribe.
- Chao, L., & Tianfeng, W. (2013), Comparison of sludge digestion under aerobic and anaerobic conditions with a focus on the degradation of proteins at mesophilic temperature. *Bioresource technology*, 140, 131-137. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852413007049>.
- Ciudad de Buenos Aires. (2018), *Norma Técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales*. Buenos Aires.
- Cleverson, V., V. S., & Fernandes, F. (2007), *Sludge Treatment and Disposal*. London: IWA Publishing.
- Climate Investments Funds. (s.f.), Obtenido de <https://www.cif.org/topics/clean-technologies>.
- _____(s.f.), Obtenido de Investing in Latin America and the Caribbean: <https://www.cif.org/country/latin-america-caribbean>.
- Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos. (Sf), *Diagnóstico de plantas de tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras municipales para 125 municipios: San Martín de las Pirámides*.
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019), Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671.
- DAI (2024), *Un fondo innovador permite a las empresas de servicios de agua de Filipinas invertir y suministrar agua segura a nuevos clientes*. Obtenido de dai-global-developments.com: <https://dai-global-developments.com/articles/innovative-fund-enables-philippine-water-utilities-to-invest/>.
- Dai, Y., Yang, S., Zhao, D., Hu, C., Xu, W., Anderson, D., Feng, L. (2023), Coastal phytoplankton blooms expand and intensify in the 21st century. *Nature*, 615.
- DGNTI (2000), *Reglamento Técnico DGNTI – COPANIT 47-2000: Agua. Usos y Disposición Final de Lodos*. Ciudad de Panamá: Dirección General de Normas y Tecnología Industrial. Gaceta Oficial de Panamá N° 24, 115.
- División de Estadística de las Naciones Unidas. (2021), *Aguas residuales domésticas tratadas de manera segura [Conjunto de datos]*. UNSTAT.
- DNP (2017), *Estrategia de país para acceso a los recursos del fondo verde del clima*. Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/Finanzas%20del%20Clima/Estrategia%20Pa%C3%ADs%20Acceso%20GCF%20Final%20Feb%202021%202018.pdf>?Web.
- ENVIROTEC (2016), *Partnership offers phosphorus recovery*. Peebles Media Group [en línea]. Obtenido de <https://envirotecmagazine.com/2016/02/04/partnership-offers-phosphorus-recovery/>.
- FAO (2022), *Regional Initiative-Sustainable and Resilient Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de <https://www.fao.org/americas/prioridades/recursos-naturales/en/>.
- FELABAN (2024), *Información macroeconómica y bancaria de América Latina [Conjunto de datos]*. Obtenido de https://indicadores.felaban.net/indicadores_homologados/index.php.
- FIDA (2023), *Fondo para el Medio Ambiente Mundial*. Obtenido de <https://www.ifad.org/es/gef>.
- Forstner, G. (2015), *AirPrex™: Biosolids Treatment Optimization and Phosphorus Removal by MAP Crystallization for BPR plants*. CSWEA Conference, Oakbrook Terrace.
- Fundación AQUAE. (2023), *El agua, clave para un desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/agua-clave-desarrollo-sostenible/>.
- García, A., & Hardy, S. (2023), *Real World Sidestream Phosphorus Recovery Performance-Comparison of Operational Performance and Benefits*. Texas Association of Clean Water Agencies.
- GCF (2024), *Green Climate Fund: Project portfolio*. Obtenido de <https://www.greenclimate.fund/projects>.
- _____(2023), *GCF PROJECT CYCLE- NBF training: EAC countries*.
- _____(2020), *Directrices acerca de la política sobre el ciclo de los proyectos y programas del fman (actualización 2020)*. Obtenido de <https://www.greenclimate.fund/document/project-preparation-facility-guidelines>.
- _____(2018), *Incremental and full cost calculation methodology GCF/B.21/03*.
- GEF (2024), *Projects operations [base de datos]*. Obtenido de <https://www.thegef.org/projects-operations/database>.
- _____(2022a), *Annex 2: Resource allocation for the eighth replenishment of the gef trust*. Global Environment Facility. Obtenido de https://www.thegef.org/sites/default/files/2023-01/GEF-8_PD_Annex2_Resource_Allocation.pdf.
- _____(2022b), *The GEF*. Obtenido de The GEF: <https://www.thegef.org/newsroom/press-releases/paises-prometen-apoyo-sin-precedentes-al-fondo-para-el-medio-ambiente>.

- GIZ (2021), *Estudio de identificación de fuentes de financiamiento climático nacional e internacional para organismos operadores de agua y saneamiento (OO) en México*.
- GlobalPetrolPrices. (2022), *El Salvador precios de la electricidad [Conjunto de datos]*. Obtenido de https://es.globalpetrolprices.com/El-Salvador/electricity_prices/.
- Gowd, S., Ramakrishna, S., & Rajendran, K. (2022), Wastewater in India: An untapped and under-tapped resource for nutrient recovery towards attaining a sustainable circular economy. *Chemosphere*, 291.
- Grez, M. T., Vogt, Y., & Cantu, V. (2023), *Emisión de bonos verdes en el sector de agua y saneamiento en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/emision-de-bonos-verdes-en-el-sector-de-agua-y-saneamiento-en-colombia>.
- Griffith, S., Netto, M., & Porto, R. (2021), *El futuro de los bancos nacionales de desarrollo y la recuperación verde*. BID. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/el-futuro-de-los-bnd-y-la-recuperacion-verde/>.
- GWl (2022), *Emisiones globales de CH₄ [Conjunto de datos]*. Global Water Intelligence. Obtenido de <https://www.gwiwaterdata.com/>.
- Hennecke, D., Bauer, A., Herrchen, M., Wischerhoff, E., & Gores, F. (2018), Cationic polyacrylamide copolymers (PAMs): environmental half life determination in sludgetreated soil. *Environ Sciences Europe*, 30(16).
- Hernández, A. (2021), *Recuperación de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Reunión técnica Economía Circular, CEPAL.
- ICMA (2021), *Green Bond Principles*. Obtenido de <https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/theprinciplesguidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp>.
- ICONTEC (2011), *Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- IICA (2023), *Trade Data Monitor [en línea]*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Obtenido de <https://blog.iica.int>.
- Intergubernamental Panel on Climate Change. (2019), *Tratamiento y eliminación de aguas residuales. En IPCC, 2019 Refinamiento a las directrices del IPCC de 2006 para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*. IPCC. Obtenido de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Cho6_Wastewater.pdf.
- _____(2006), Tratamiento y eliminación de aguas residuales. En IPCC, *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (págs. 6.1, 6.31).
- IPN (2013), *PTAR Centenario Bicentenario y San Miguelito, Resumen ejecutivo*. Instituto Politecnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
- JMP (2023), *Abastecimiento de Agua, Saneamiento e Higiene gestionados de manera segura [Conjunto de datos]*. Obtenido de <https://washdata.org/data/household#!/table?geo0=region&geo1=sdg>.
- _____(2020), *Nota orientativa para facilitar la consulta nacional sobre las estimaciones del programa conjunto de monitoreo con relación al agua potable, el saneamiento y la higiene en los hogares*. Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento del Agua, el Saneamiento y la Higiene.
- Johannessen, A., Rosemarin, A., Thomalla, F., Swartling, Å. G., Stenström, T. A., & Vulturius, G. (2014), Strategies for building resilience to hazards in water, sanitation and hygiene (WASH) systems: The role of public private partnerships. *International Journal of Disaster Risk Reduction*(10), 102-115.
- Lee, R. (2018a), *Ostara Nutrient Recovery Technologies*. Ohio Nutrients Workshop.
- _____(2018b), *Ostara Nutrient Recovery Technologies. National Nutrient Reuse and Recovery Forum*.
- Lentini, E. (2022), *Hacia una agenda de seguridad hídrica para América Latina y el Caribe 2030*. Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF).
- _____(2015), *El Futuro de los Servicios de Agua y Saneamiento en América Latina. Desafíos de los Operadores de Áreas Urbanas de más de 300,000 habitantes*. Washington DC, United States: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- López, J., Ramírez, B., Gomes, C., & Morgan-Sagastume, J. (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. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf.
- Ludeña, C., de Miguel, C., & Schuschny, A. (2015), Cambio climático y mercados de carbono: repercusiones para los países en desarroll. (116), 61-85.

- MAG (2023), *Informe Semanal de Precios de los Principales Productos Agropecuarios, e Insumos 2023: Semana del 17 al 21 de Julio*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador .
- MAPA (2020), *Instrução Normativa N° 61* . Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Diário Oficial da União.
- _____(2016), *Instrução Normativa N° 7*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Diário Oficial da União.
- MARN (2020), *Resumen de evaluación de impacto regulatorio: Lineamientos técnicos para la evaluación de actividades, obras o proyectos que comprendan el manejo y reúso de lodos provenientes de aguas residuales*. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- _____(2019), *RTS: Aguas Residuales. Parámetros de calidad de aguas residuales para descarga y manejo de lodos residuales*. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la República de El Salvador, tomo 423.
- Mejía, L., & Delgado, M. (2020), *Impacto macroeconómico y social de la inversión en infraestructura en Colombia, 2021-2030*. Bogotá, Colombia: FEDESARROLLO. Obtenido de [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3960/Repor_Mayo_2020_Mej%
c3%ada_y_Delgado.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3960/Repor_Mayo_2020_Mej%c3%ada_y_Delgado.pdf?sequence=4&isAllowed=y).
- Mejías, C., Martín, J., Santos, J., Aparicio, I., & Alonso, E. (2021), Occurrence of pharmaceuticals and their metabolites in sewage sludge and soil: A review on their distribution and environmental risk assessment. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 30.
- MINAM (2017), *Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA. Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Lima: Ministerio de Medio Ambiente. El Peruano N° 38, Normas Legales.
- Ministerio del Ambiente-Ecuador. (2019), *Programa de Fortalecimiento de Capacidades en Formulación de Propuestas para acceder a Financiamiento Climático- Modulo 9*.
- MINSEGPRES (2009), *Decreto 4, "Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas"* . Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Minvivienda (2014), *Decreto 1287 "por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales"*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia.
- Monballiu, A., Ghyselbrecht, K., Pinoy, L., & Meesschaert, B. (2020), Phosphorus reclamation by end-of-pipe recovery as calcium phosphate from effluent of wastewater treatment plants of agroindustry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5).
- Naciones Unidas. (2022), *Progresos realizados para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Informe del Secretario General*. Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas.
- Netto, M., Pereira, R., Trabacchi, M., Schneider, S., Harb, S., & Smallridge, D. (2021), *A Guidebook for National Development Banks on Climate Risk*. BID.
- Nolasco, D. A. (2010), *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiemnto de aguas residuales*. BID.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Güereca, L. (2013), *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- OCDE (2023a), *Climate Finance Provided and Mobilised by Developed Countries in 2013-2021: Aggregate Trends and*.
_____(2023b), *Private Finance Mobilised by Official Development Finance*. Paris: OECD Publishing.
- _____(2022), *Watered down? Investigating the financial materiality of water-related risks in the financial system*. OECD.org. Obtenido de [https://www.oecd.org/water/Background-paper-RT-on-Financing-
Water-and-Climate-Action-Session-3.pdf](https://www.oecd.org/water/Background-paper-RT-on-Financing-Water-and-Climate-Action-Session-3.pdf).
- _____(2019), *Making Blended Finance Work for Water and Sanitation: Unlocking Commercial Finance for SDG 6*. Paris: OECD Publishing.
- ONU Mujeres (2018), *Hacer las Promesas Realidad: La Igualdad de Género en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York, Estados Unidos de América: Naciones Unidas, Programa para la Igualdad de Género y el Empoderamiento de las Mujeres.
- Ostara (2018), *Shafdan Wastewater Treatment Plant will be the first in the region to install an Ostara Nutrient Recovery Facility*. Obtenido de <https://www.ostara.com/shafdan-wastewater-treatment-plant/>.

- Pavlostathis, S. G. (2011), Kinetics and Modeling of Anaerobic Treatment and Biotransformation Processes. *Comprehensive Biotechnology*, 6, 336-348. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444640468003645>.
- Prowse, D. S. (1992), The structure of corporate ownership in Japan. *The Journal of Finance*, 47(3), 1121-1140.
- PSP (2016). Proyecto Panamá Oeste. Programa de Saneamiento de Panamá [en línea]. Obtenido de <https://www.saneamientodepanama.gob.pa/>.
- Ramírez, T., Medrano, O., & Escobedo, L. (2020), Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El caso de la PTAR zona noreste, Villahermosa, México. *EnerLAC*, 4(1), 12-30.
- Rodriguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020), *From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean*. Washington, DC, United States: World Bank. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative>.
- Sánchez, A. (2021), Chapter Nine - Toward Zero Liquid Discharge industrial facilities: Reducing the impact on freshwater resources by reusing industrial and urban wastewaters. En C. Hussain, *Concepts of Advanced Zero Waste Tools*. Elsevier.
- Sánchez, A. S. (2020), Technical and economic feasibility of phosphorus recovery from wastewater in São Paulo's Metropolitan Region. *Journal of Water Process Engineering*, 38(101537).
- Sánchez, A., & Martins, G. (2021), Nutrient recovery in wastewater treatment plants: Comparative assessment of different technological options for the metropolitan region of Buenos Aires. *Journal of Water Process Engineering*, 41(102076).
- Saravia Matus, S., Fernández, D., Montañez, A., López, S., Naranjo, L., & Llavona, A. (2023a), Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: Efectos en empleo verde y valor agregado bruto. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo*(218).
- Saravia Matus, S., Fernández, S., Montañez, A., Gil, M., Blanco, E., Llavona, A., Sarmanto, N. (2023b), From wastewater to renewable energy production: Opportunities and challenges in mid-sized cities in Latin America and the Caribbean. *Natural Resources Forum*, 47(4), 789-816.
- Saravia Matus, S., Gil, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., Sarmanto, N. (2022a), *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 213 (LC/TS.2022/193).
- Saravia Matus, S., Gil, M., Sarmanto, N., Blanco, E., Llavona, A., & Naranjo, L. (2022b), *Brechas, desafíos y oportunidades en materia de agua y género en América Latina y el Caribe*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Saravia Matus, S., Montañez, A., Fernández, D., & Sarmanto, N. (2023c), *Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en El Salvador, México y Panamá*. Santiago: CEPAL. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/67976-diagnostico-la-prestacion-servicios-agua-potable-saneamiento-salvador-mexico>.
- Schalatek, L., & Watson, C. (2021), *El Fondo Verde del Clima: Información básica sobre financiamiento para el clima*. Cimate Funds Update.
- Schultz, C. (2009), Sustainable Solution for Phosphate and Ammonium Removal. *Pollution Solutions*.
- SEMARNAT (2022), *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación.
- _____. (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 Protección ambiental –lodos y biosólidos–. Especificaciones y límites máximos permisibles para su aprovechamiento y disposición final*. Diario Of. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación.
- Sena, M., Seib, M., Noguera, D., & Hicks, A. (2021), Environmental impacts of phosphorus recovery through struvite precipitation in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 280(1).
- Silva, I., Mambeli, R., & Tiago, G. (2016), Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment Plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, 126, 504-514.
- Smith, D., Harmel, R., Williams, M., Haney, R., & King, K. (2016), Managing Acute Phosphorus Loss with Fertilizer Source and Placement: Proof of Concept. *Agricultural & Environmental Letters*, 1.
- Struvite Removal (2023), How to remove struvite? Struvite removal solution. Obtenido de <https://www.struviteremoval.com/struvite-wastewater-treatment/struvite-removal/how-to-remove-struvite>.

- Sunass (2015), *Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento*. Lima, Perú: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento del Perú.
- Taurus (2023), *Crystal Green product info & research highlights*. Taurus Agricultural Marketing Inc. [en línea]. Obtenido de <https://taurus.ag/product/crystal-green/>.
- The Nature Conservancy. (2021), *Manual Estratégico para el Financiamiento Climático*. Obtenido de https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/Playbook_ClimateFinance_Revision_21.09_ES_LR.pdf.
- Tomei, M., Stazi, V., Daneshgar, S., & Capodaglio, A. (2020), Holistic approach to Phosphorus recovery from urban wastewater: enhanced biological removal combined with precipitation. *Sustainability*, 12(2).
- Tuholske, C., Halpern, B., Blasco, G., Villasenor, J., Frazier, M., & Caylor, K. (2021), Mapping global inputs and impacts from of human sewage in coastal ecosystems. *PLoS ONE*, 16(11).
- UE (2023), *European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023-Final Report*. Unión Europea.
- UE (2021), *Reglamento Delegado 2021/2086*. Bruselas: Unión Europea. Diario Oficial de la Unión Europea.
- UE (2019), *Reglamento 2019/1009*. Bruselas: Unión Europea.
- UNEP (2023), *WastewaterTurning Problem to Solution*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- _____. (2022), *Climate Promise*. Obtenido de [limatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-son-los-mercados-de-carbono-y-por-que-son-importantes](https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-son-los-mercados-de-carbono-y-por-que-son-importantes).
- _____. (2021), *Global Methane Assessment*. United Nations Environment Programme.
- _____. (2020), <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>.
- _____. (2010), *State of Biodiversity in Latin America and the Caribbean*. Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cbd.int/gbo/gbo3/doc/StateOfBiodiversity-LatinAmerica.pdf](https://www.cbd.int/gbo/gbo3/doc/StateOfBiodiversity-LatinAmerica.pdf).
- UNESCO (2023), *Water Security and Cities Integrated Urban Water Management*. Global water security issues series 4. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388100#>.
- UNFCCC (2022), *El Acuerdo de París*. Obtenido de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>.
- United Nations Climate Change*. (s.f.), Obtenido de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>.
- UNSDG (2023), *Las aguas residuales pueden proporcionar energía a 500 millones de personas*. United Nations Sustainable Development Group. Obtenido de <https://unsdg.un.org/es/latest/stories/las-aguas-residuales-pueden-proporcionar-energ%C3%ADa-500-millones-de-personas>.
- Vallet, B. (2017), Sewage sludge destination in Europe. *EurEau*.
- Vidal, J., Huiliñir, C., & Salazar, R. (2016), Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes. *Electrochimica Acta*, 210.
- Von Sperling, M. (2005), *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Obtenido de <https://www.worldcat.org/title/principios-do-tratamento-biologico-de-aguas-residuarias/oclc/77543218>.
- Watson, C., Schalatek, L., & Evéquo, A. (2022), *Informe temático sobre financiamiento para el clima: Financiamiento para la mitigación*. Climate Funds Update.
- Wendland, A. (2005), *Operation Costs of wastewater Treatment Plants*. Lesson C2, EMWATER (Efficient Management of Wastewater) e-learning course. InWent gGmbH/Unión Europea.
- Wilsenach, J., & Van Loosdrecht, M. (2004), Effects of separate urine collection on advanced nutrient removal processes. *Environmental Science & Technology*, 38(4).

Anexos

Anexo A1

Estimación de las emisiones de metano en fase secundaria de tratamiento de aguas residuales

En esta sección se explica el método usado para estimar el volumen de metano emisible (y captable) en el tratamiento secundario de las aguas residuales, a partir de la metodología propuesta por el IPCC (2019):

$$CH_4 = (TOW - S) * EF \quad (1)$$

$$S = Smass * Krem \quad (2)$$

$$EF = Bo * MCF \quad (3)$$

$$GA = CH_4(1 - L) \quad (4)$$

donde:

- CH₄:** Cantidad de metano generado por el tratamiento aerobio o anaerobio (kg/año)⁴⁵.
- TOW:** Carga orgánica de DQO específica que recibe el sistema anaerobio (kg/año) o de DBO (Kg/año) que recibe el sistema aerobio
- S:** Componente orgánico removido de las aguas residuales en forma de lodo (kg DQO/año, o, Kg DBO/año).
- EF:** Factor de emisión de metano (kg CH₄/kg DQO, o, kg CH₄/kg DBO).
- Smass:** Cantidad de lodo removido en el proceso de tratamiento secundario, ya sea aerobio o anaerobio (Kg/año). Para estimar este valor, se parte de la carga orgánica que ingresa al sistema, y se multiplica por un factor de generación de lodos. De acuerdo con Cleverson, von Sperling y Fernandes (2007) para sistemas anaerobios, este factor varía entre 0,12 a 0,18 Kg SS/Kg DQO aplicada (se recomienda adoptar 0,15). En sistemas aerobios dependerá de la tecnología, por ejemplo, en Lodos Activados Convencionales y en plantas que operan con biofiltros aireados sumergidos se adopta valor de producción de sólidos de 0,6 a 0,8 Kg SST/Kg DQO aplicada; mientras en filtros percoladores, se considera que la producción de lodo es en promedio de 0,55 a 0,75 kg SST/kg DQO.
- Krem:** Factor de lodo⁴⁶ (kg DBO/kg de masa de lodo seco)⁴⁷. Acorde con los valores de referencia contenidos en la Tabla 6.6A de las metodologías del IPCC (2019), cuando se trata de lodos provenientes de un tratamiento anaerobio, se recomienda adoptar el valor default de 0,8 kg DBO/Kg de masa de lodo seco; en el caso de lodos provenientes de un tratamiento aerobio a los cuales se adiciona un proceso de digestión anaerobia de lodos, se recomienda adoptar como valor default 1 kg DBO/Kg de masa de lodo seco.
- Bo:** Capacidad máxima de producción de CH₄. De acuerdo con IPCC (2019) este parámetro equivale a 0,6 (kg CH₄/kg DBO), o 0,25 (kg CH₄/kg DQO).
- MCF:** Factor corrector para el metano (fracción o porcentaje). Es una indicación de la medida o grado en que cada sistema es anaerobio y, por tanto, varía en función del sistema de tratamiento. Por ejemplo, en reactores cerrados perfectamente anaeróbicos, como el caso de reactores UASB, su valor es de 1. En lagunas anaerobias se recomienda valor de 0,8 (IPCC, 2019). Para los sistemas aerobios, si bien el IPCC (2006) establecía un factor de cero para sistemas aerobios compactos, dicho parámetro fue corregido en las metodologías actualizadas del IPCC (2019),

⁴⁵ Para expresar el metano en volumen (m³) se procede a dividir por el valor de la densidad del gas (se recomienda adoptar valor estándar de 0,67 kg/m³).

⁴⁶ Cantidad de materia orgánica contenida en el lodo.

⁴⁷ Puede multiplicarse por un factor de 2,08 si se quiere realizar la estimación en función de la DQO.

donde se ha determinado que es posible que existan emisiones de CH₄ en algunas fases de tratamiento en sistemas aerobios (por ejemplo, en los estanques de sedimentación), por lo que han determinado un rango entre de 0,003 a 0,09.⁴⁸

- GA:** Cantidad de metano (CH₄) aprovechable (m³).
- L:** Fracción del biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización (es decir, metano no captado). 0,1 es un valor estándar para reactores RAFA y digestores anaerobios de lodos. Cuando se capta el metano, ya sea para quemarlo en antorcha o para aprovechamiento energético, una fracción del biogás se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización. Por lo tanto, la diferencia entre el metano generado y el metano captado será el metano emitido a la atmósfera.

Anexo A2

Estimación de las emisiones de metano a partir de digestión anaerobia de lodos aerobios

En esta sección se incluye la fórmula recomendada por el IPCC (2019) para el cálculo de las emisiones en procesos de digestión anaerobia de lodos, la cual está incluida en la Tabla 4.1, Capítulo 4 del Volumen 5 de las Metodologías del IPCC. El metano generado en la estabilización de lodos aerobios en un biodigestor anaerobio se presenta de la forma:

$$CH_4 = M * EF \quad (5)$$

donde:

- CH₄:** Cantidad de metano generado por el tratamiento anaerobio (kg/año)⁴⁹.
- M:** Masa de residuos orgánicos tratados por el tratamiento biológico. Se asume como la cantidad de SST (lodo) generado por el proceso de tratamiento biológico previo, expresada en Kg. Este valor corresponde al parámetro Smass presentado en la ecuación.
- EF:** Factor de emisión de metano (g CH₄/kg de lodo tratado). Se adoptan valores aplicados por López y otros, (2017) de producción teórica de biogás de 0,8 m³/Kg SV, equivalente a 0,56 m³/kg ST (375 g de CH₄/Kg de lodo).

En este caso, también debe aplicarse la ecuación 4 para estimar el metano aprovechable.

⁴⁸ En el caso de procesos aerobios, se adopta el valor adoptado es de 0,03.

⁴⁹ Para expresar el metano en volumen (m³) se procede a dividir por el valor de la densidad del gas (se recomienda adoptar valor estándar de 0,67 kg/m³).

Anexo A3

Estimación del potencial energético del metano y de la energía eléctrica generable

Una vez determinados los volúmenes de metano emitidos y aprovechables, en cada etapa (tratamiento secundario y digestión de lodos), es posible estimar el contenido energético de este metano.

La energía eléctrica generable (kWh/año) y la energía calórica recuperable asociada a la generación eléctrica (cogeneración) (kWh/año) se estima con base en estas ecuaciones:

$$CEM = GA * PCI \quad (6)$$

$$GE_e = CEM * ESG_e \quad (7)$$

$$GE_c = CEM * ESG_c \quad (8)$$

donde:

- CEM:** Contenido energético del metano captado (kWh/año).
- GA:** Cantidad de metano (CH₄) aprovechable (m³).
- PCI:** Poder calorífico del metano. Valor típico: 9,97 (kWh/año).
- GE_e:** Energía eléctrica generable (kWh/año).
- GE_c:** Energía calórica generable (kWh/año).
- ESG_e:** Eficiencia del sistema generador de energía eléctrica. Se presume un 35% de eficiencia promedio de generación eléctrica⁵⁰.
- ESG_c:** Eficiencia del sistema de recuperación de calor. Se presume un 40% de eficiencia promedio de recuperación de calor (enfriamiento del motor y de los gases de escape)⁵¹.

⁵⁰ Puede variar entre 20% y 45% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

⁵¹ Puede variar entre 30% y 50% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

Anexo A4

Glosario de términos usados en los análisis de viabilidad económica

Capital Expenditures (CAPEX-Gastos de capital): Inversión en capital para adquirir e instalar los equipamientos necesarios en un proyecto industrial.

Operating Expenses (OPEX-Costos operativos): Gastos necesarios para operar una instalación industrial (electricidad, insumos químicos y otros consumibles, horas/hombre en manutención y operación).

Valor Presente Neto (VPN o VAN): Es el valor de los flujos de efectivo (ingresos-gastos) proyectados, descontados al presente.

$$VPN = \frac{Rt}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Rt: Flujo de efectivo o pago en el periodo t.

i: Tasa de descuento.

t: número del periodo t.

Valor Presente Neto acumulado (VPN acumulado): VPN acumulado a cada año desde que se inició el proyecto (suma del VPN de ese año y de los anteriores). El VPN acumulado en el año t se presenta de la forma

$$VPN_{actT} = \sum_{t=0}^T VPN_t \quad (10)$$

VPN_{act}: Valor presente acumulado hasta el año T.

VPN_t: Valor presente resultante en el periodo t.

Tiempo de retorno del capital (Payback): Tiempo de retorno desde la inversión inicial hasta el momento en que los rendimientos acumulados se tornan iguales al valor de esa inversión. También corresponde al año en que el VPN acumulado pasa de negativo a positivo.

Tasa Interna de Retorno (TIR): Es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Está expresada como un porcentaje. La TIR equivale a la tasa i que hace cero la suma del VPN acumulado durante toda la vida útil del proyecto (20 años).

Anexo A5

Viabilidad regulatoria para la recuperación de biosólidos en Bogotá, Panamá y El Salvador

A. Región metropolitana de Bogotá

Colombia ha establecido un marco normativo para regular el aprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). En 2004 se publicó la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, que consideraba los biosólidos aptos para producir abonos orgánicos, orgánico-minerales y enmiendas de suelo, estableciendo requisitos y límites para cada tipo de producto. En 2014 se promulgó el Decreto 1287 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que divide los biosólidos en dos categorías (A y B) según sus contenidos de metales y contaminantes microbiológicos, y regula sus posibles usos.

Los biosólidos Tipo A y Tipo B pueden destinarse a varios usos, incluyendo agricultura, plantaciones forestales, estabilización de taludes, y valorización energética, entre otros. Sin embargo, aquellos que no cumplan con los requisitos mínimos solo pueden ser utilizados en procesos de valorización energética o dispuestos en rellenos sanitarios. A pesar de este marco normativo claro, el aprovechamiento de los biosólidos aún está en una etapa incipiente en Colombia, aunque se han observado iniciativas en varias PTAR del país desde la promulgación del Decreto 1287. Es importante destacar que el Río Bogotá y sus afluentes son objeto de intensos debates debido a su importancia para el país y su estado precario de saneamiento, lo que ha llevado a la planificación de importantes plantas de tratamiento como la PTAR Salitre y la futura PTAR Canoas.

La PTAR Salitre produce biosólidos de categoría Tipo B, que se utilizan principalmente como enmienda orgánica en diversos predios. Sin embargo, su disposición a largo plazo plantea desafíos debido a limitaciones de espacio y posibles acumulaciones de metales en el suelo. Se espera que la futura PTAR Canoas genere una cantidad aún mayor de biosólidos, lo que subraya la necesidad de identificar nuevas áreas para su disposición. Aunque el uso agrícola de los biosólidos está limitado por sus características, especialmente en el caso de la PTAR Salitre, se espera que su clasificación mejore con la PTAR Canoas, abriendo nuevas oportunidades para su aprovechamiento en procesos de compostaje y fabricación de abonos orgánicos. En última instancia, el aprovechamiento de los biosólidos podría reducir la importación de fertilizantes químicos y ofrecer alternativas sostenibles para la gestión de residuos en Colombia.

B. Región metropolitana de Panamá

En Panamá, las normas para la reutilización de lodos residuales se encuentran en el Reglamento Técnico COPANIT-DGNTI 47-2000, llamado "Uso y Disposición de Lodos". Este reglamento permite tanto la aplicación directa como la transformación previa de lodos de PTAR, siempre y cuando hayan pasado por diversos métodos de tratamiento. La clasificación de los lodos en Clase I o Clase II depende del método de tratamiento, mientras que el uso de lodos industriales para aplicaciones agrícolas está prohibido a menos que se demuestre su cumplimiento con los estándares de metales pesados y coliformes fecales mediante análisis de laboratorio autorizado.

Los lodos de Clase I son sometidos a procesos como digestión aeróbica, anaeróbica, secado al aire o estabilización mediante ajuste de pH, mientras que los de Clase II pasan por tratamientos como compostaje, secado con calefacción, digestión anaeróbica termófila o pasteurización. La normativa también establece límites máximos de metales pesados y coliformes fecales para los lodos, así como restricciones y aplicaciones según el contenido de sólidos.

Aunque el marco normativo es claro, la aplicación práctica en Panamá es limitada. La mayoría de los lodos de la PTAR Juan Díaz se utilizan como cobertura en el vertedero de Cerro Patacón, lo que disminuye su vida útil. Sin embargo, se han propuesto alternativas como la utilización de los lodos como fertilizante y mejorador de suelos en áreas agrícolas cercanas. Se han realizado estudios y planes piloto para aprovechar los lodos en la producción de abono orgánico mediante compostaje, mostrando el potencial de estos residuos para usos beneficiosos en la agricultura y la reforestación

C. Región metropolitana de San Salvador

Hasta ahora, en El Salvador, ha habido pocas iniciativas de aprovechamiento agrícola de lodos de PTAR. La normativa actual, RTS 13.05.01:18, distingue entre lodos especiales y ordinarios, estos últimos provenientes de PTAR, y permite su uso como cobertura en rellenos sanitarios o en suelos, incluidos los agrícolas, siempre que se informe sobre varios parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Actualmente, se están evaluando propuestas para desarrollar una regulación más específica que aborde la clasificación, parámetros de calidad, tipo de reúso y disposición final de los lodos ordinarios. Se considera la norma mexicana de uso de lodos como referencia clave para esta futura regulación, que clasifica los lodos en tres categorías según su contenido de metales y patógenos, contemplando tres posibles usos según la clase.

El desarrollo de esta nueva norma sería fundamental para regular y promover el aprovechamiento de los lodos generados por las PTAR, especialmente en un momento en el que se están considerando nuevas infraestructuras de tratamiento de aguas residuales en la Región Metropolitana de San Salvador, como la PTAR planeada en Aguilares, con capacidad para atender a una gran población y que generaría grandes cantidades de lodos por día.

Anexo A6

Parámetros para la estimación de CAPEX y OPEX en 4 tipos de tecnologías de recuperación de estruvita

A continuación, se presentan dos cuadros (Cuadro 36 y Cuadro 37) que sirven de referencia para calcular los beneficios económicos y los costes de inversión (CAPEX) y operativos (OPEX) generados con cada uno de los cuatro tipos de sistemas de estruvita, en PTAR de 3 tamaños diferentes (3 a 5 m³/s; 5 a 7 m³/s y 7 a 16 m³/s) y considerando cuatro diferentes tipos de sistemas de precipitación de estruvita:

- i) Sistema de centrado con tanque de pretratamiento de lodos WASSTRIP®. Suelen poseer el mayor CAPEX de los cuatro. Son una solución técnica más compleja ya que requieren de un mayor espacio para colocar el tanque y pueden ser necesarias algunas alteraciones en la línea de lodos de la PTAR. Por esta razón, se indican los datos de este tipo de sistema en los cuadros (beneficios económicos, OPEX y CAPEX) pero no se consideran en los análisis de viabilidad que serán realizados en las PTAR de San Salvador, PTAR Juan Díaz, PTAR Salitre y PTAR Canoas.
- ii) Sistema de centrado sin pretratamiento. El CAPEX suele ser significativamente mayor que el de los sistemas de digestato. Además de MgCl₂ consumen NaOH. La estruvita que es precipitada alcanza un tamaño suficiente para ser recolectada en forma de pellets, y comercializada.
- iii) Sistema de digestato con recolección de estruvita. Consumen MgCl₂ pero no NaOH, ya que el pH del reactor se regula mediante el soplado de aire (consumen más energía eléctrica por esa razón). También se recolecta la estruvita que se precipita.
- iv) Sistema de digestato con secuestro de la estruvita en el lodo. En estos sistemas, la estruvita precipita en forma de cristales pequeños que no se separan y se recolectan, sino que se dejan en el lodo. Por lo tanto, no se obtiene el beneficio económico de la venta de estruvita. El reactor es de menor volumen y por ello tienen un CAPEX menor (aproximadamente la mitad) que los sistemas de digestato que sí realizan la recolección de estruvita.

Cuadro A6.1
CAPEX-Costes de capital (equipamiento e instalación) para sistemas de precipitación de estruvita, en PTAR de tres tamaños diferentes

Tipo y capacidad de la PTAR	Parámetro	Sistema de centrado con pretratamiento de lodos	Sistema de centrado sin pretratamiento	Sistema de digestivo con Recolección de estruvita	Sistema de digestato con Secuestro de estruvita en el lodo
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 3 y 5 m ³ /s (entre 1 y 2 millones de P _{eq})	CAPEX (USD)	25 000 000	20 000 000	3 750 000	1 800 000
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 5 y 7 m ³ /s (entre 2 y 3 millones de P _{eq})	CAPEX (USD)	25 000 000	20 000 000	10 350 000	5 437 500
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 7 y 16 m ³ /s (entre 3 y 5,6 millones de P _{eq})	CAPEX (USD)	30 000 000	28 000 000	23 657 100	12 428 600

Fuente: Elaboración propia con apoyo técnico de CNP/Centrisys y de Evoqua, 2023.

Cuadro A6.2
OPEX-Consumo de energía, insumos químicos y manutención para sistemas de precipitación de estruvita,
en PTAR de tres tamaños diferentes

Tipo y capacidad de la PTAR	Parámetro	Sistema de centrado con pretratamiento de lodos	Sistema de centrado sin pretratamiento	Sistema de digestato con Recolección de estruvita	Sistema de digestato con Secuestro de estruvita en el lodo
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 3 y 5 m ³ /s (entre 1 y 2 millones de P _{eq})	Tipo del sistema	Tanque WASSTRIP + reactor Pearl® P10k	Reactor Pearl® P10k	2 reactores MagPrex 2x40' MagPrex®	1 reactor MagPrex 2x40' MagPrex®
	Caudal de cada reactor	7 222 m ³ /día	727 m ³ /día	616 m ³ /día	616 m ³ /día
	Potencia eléctrica	84 kW	33 kW	31 kW	15,5 kW
	Consumo total de energía eléctrica	1 970 kWh/día	792 kWh/día	744 kWh/día	372 kWh/día
	Consumo de energía eléctrica para secado de la estruvita	1 019 kWh/día	609 kWh/día	—	—
	Consumo de MgCl ₂ (32%)	2,26 toneladas secas/día	0,75 toneladas secas/día	1 325 litros/día	1 325 litros/día
	Consumo de NaOH (50%)	2,90 toneladas secas/día	0,28 toneladas secas/día	—	—
	Manutención	considerar un 2% del resto del OPEX			
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 5 y 7 m ³ /s (entre 2 y 3 millones de P _{eq})	Tipo del sistema	Tanque WASSTRIP + reactor Pearl® P10k	Reactor Pearl® P10k	8 reactores MagPrex 4x50' MagPrex®	4 reactores MagPrex 4x50' MagPrex®
	Caudal de cada reactor	7 222 m ³ /día	727 m ³ /día	3 521 m ³ /día	3 521 m ³ /día
	Potencia eléctrica	84 kW	33 kW	134 kW	67 kW
	Consumo total de energía eléctrica	1 970 kWh/día	792 kWh/día	3 210 kWh/día	1 605 kWh/día
	Consumo de energía eléctrica para secado de la estruvita	1 019 kWh/día	609 kWh/día	—	—
	Consumo de MgCl ₂ (32%)	2,26 toneladas secas/día	0,75 toneladas secas/día	7 571 litros/día	7 571 litros/día
	Consumo de NaOH (50%)	2,90 toneladas secas/día	0,28 toneladas secas/día	—	—
	Manutención	considerar un 2% del resto del OPEX			
PTAR de lodos activados con digestión anaeróbica de lodos y capacidad entre 7 y 16 m ³ /s (entre 3 y 5,6 millones de P _{eq})	Tipo del sistema	Tanque WASSTRIP + 2 reactores Pearl® P10k	2 reactores Pearl® P10k	16 reactores MagPrex 2x50' MagPrex®	8 reactores MagPrex 2x50' MagPrex®
	Caudal de cada reactor	7 222 m ³ /día	7 222 m ³ /día	3 521 m ³ /día	3 521 m ³ /día
	Potencia eléctrica	117 kW	66 kW	306 kW	157 kW
	Consumo total de energía eléctrica	2 762 kWh/día	1 584 kWh/día	7 337 kWh/día	3 771 kWh/día
	Consumo de energía eléctrica para secado de la estruvita	1 429 kWh/día	1 218 kWh/día	—	—
	Consumo de MgCl ₂ (32%)	4,52 toneladas secas/día	1,50 toneladas secas/día	17 305 litros/día	17 305 litros/día
	Consumo de NaOH (50%)	5,80 toneladas secas/día	0,56 toneladas secas/día	—	—
	Manutención	considerar un 2% del resto del OPEX			

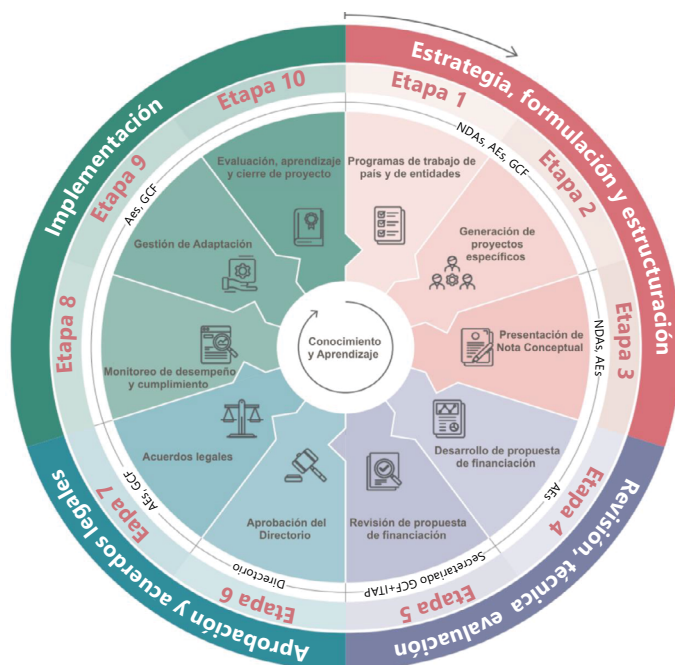
Fuente: Elaboración propia con apoyo técnico de CNP/Centrisys y de Evoqua, 2023.

Anexo A7

Ciclo de actividad de los proyectos/programas financiados por el GCF

Se identifican 10 etapas principales, que parten de la definición de programas de trabajo definidos en cada país o por entidades acreditadas (etapa 1) y la generación de proyectos específicos (etapa 2). Los actores y entidades que juegan un papel crucial en estas etapas iniciales, así como en la preparación de las Notas Conceptuales (etapa 3) y propuestas de financiación (PPF, etapa 4), son las Autoridades Nacionales Designadas (NDA por sus siglas en inglés) quienes avalan inicialmente las iniciativas en el marco de las planes y políticas nacionales y las Entidades Acreditadas (AE por sus siglas en inglés).

Diagrama A7.1
Ciclo de actividad de los proyectos/programas financiados por el GCF



Fuente: Tomado de guías del GCF (GCF, 2023).

Las NDA constituyen los enlaces oficiales entre los países receptores y el GCF. Las NDA tienen como objetivo principal proveer la supervisión estratégica de las iniciativas climáticas asegurando que las propuestas de financiamiento presentadas al GCF estén alineadas con las necesidades y prioridades del país, definidas estas últimas a nivel de un Programa País y que responden, en temas de mitigación, a las metas y prioridades de reducción nacional de GEI contempladas en las NDC. Por su parte, las AE son instituciones públicas, privadas u ONG de carácter subnacional, nacional, regional o internacional, que han surtido un proceso de acreditación ante el GCF para desarrollar, ejecutar y monitorear proyectos y programas financiados por el Fondo⁵²; se podría resumir estos roles, afirmando que las AE son las entidades implementadoras de proyectos y programas ante el GCF, los cuales serán ejecutados de manera específica por ellas mismas o a través de una o de varias Entidades Ejecutoras.

⁵² Los proyectos en adaptación y mitigación que apoya el GCF son implementados por sus organizaciones asociadas, conocidas como AE (entidades acreditadas). El GCF promueve el financiamiento de proyectos a través de entidades internacionales y nacionales, estas últimas, denominadas por el GCF como Entidades acreditadas de Acceso Directo.

Una vez se han obtenido y presentado las Notas Conceptuales o las propuestas de financiación por parte de las AE (etapa 4), las mismas son sometidas a revisión por parte de la Secretaría del GCF (etapa 5). La Secretaría del GCF es un actor independiente y se encarga de ejecutar las operaciones autorizadas por las decisiones de la Junta Directiva del Fondo⁵³.

El número máximo de páginas de una Nota Conceptual es de 12, excluidos los anexos. Las Propuestas que excedan la extensión indicada no serán evaluado dentro del tiempo estándar de servicio indicativo de 30 días. De acuerdo con la Política de Divulgación de Información del GCF, la Nota Conceptual y los documentos adicionales proporcionados a la Secretaría del GCF puede ser divulgada a menos que la(s) NDA lo marquen como confidencial. La Secretaría informará a las NDA pertinentes de la Nota Conceptual al recibirla. La NDA también puede presentar la nota conceptual directamente con o sin una AE a identificada en este escenario. La Secretaría informará a las AE nominadas por la NDA, si la hubiera. Se recomienda a las AE y/o NDA que presenten una Nota Conceptual antes de realizar una Solicitud de apoyo para la preparación de proyectos del Fondo de Preparación de Proyectos (PPF).), las propuestas pasan a la fase de aprobación por parte del Directorio o Junta Directiva (etapa 6), luego de lo cual se preparan, revisan y suscriben los acuerdos legales requeridos para la ejecución del proyecto/programa (Etapa 7). Posteriormente, durante el proceso de ejecución se adelanta el monitoreo y seguimiento de la implementación (etapa 8) y la gestión para adaptar y adecuar el proyecto/programa a las condiciones/restricciones que se puedan presentar (etapa 9), labor que es responsabilidad de la AE, en coordinación del GCF, para finalmente adelantar las acciones de evaluación, identificación de lecciones aprendidas y cierre del proyecto (etapa 10).

⁵³ La Junta está conformada por miembros de países desarrollados y en desarrollo de forma equitativa; está encargada de dirigir y supervisar el GCF y es responsable de las decisiones relacionadas al otorgamiento de financiamiento, entre otras funciones principales. La Junta se reúne por lo general tres veces al año y sus decisiones son tomadas por consenso. La Junta rinde cuentas ante la CMNUCC a través de informes anuales.



NACIONES UNIDAS

Serie

C E P A L

Recursos Naturales y Desarrollo

Números publicados

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

222. Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Antonio Santos, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/36), 2024.
221. Oportunidades para la adopción del enfoque de cadenas de valor en el ámbito de los recursos hídricos, Elisa Blanco (LC/TS.2023/201), 2024.
220. Recursos naturales y desarrollo sostenible. Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe, Jeannette Sánchez y Mauricio León (LC/TS.2023/198), 2023.
219. Cuentas satélite de bioeconomía para 13 países de América Latina y el Caribe: metodología y resultados, Renato Vargas, Andrés Mondaini y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2023/138), 2023.
218. Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: efectos en el empleo verde y el valor agregado bruto, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Santiago López, Lisbeth Naranjo y Alba Llavona (LC/TS.2023/101), 2023.
217. Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en El Salvador, México y Panamá, Silvia Saravia Matus, Alfredo Montañez, Diego Fernández y Natalia Sarmanto (LC/TS.2023/96), 2023.
216. Pathways to sustainable planning for a just energy transition in Latin America and the Caribbean: an analysis of best practices in selected countries, Antonio Levy, Diego Messina, René Salgado and Rubén Contreras Lisperguer (LC/TS.2023/4), 2023.
215. Acción climática en la agricultura: la experiencia de países miembros de la Plataforma de Acción Climática en Agricultura de Latinoamérica y el Caribe, Walter Oyhançabal y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2022/240), 2022.
214. Cuenta satélite de bioeconomía para Costa Rica: propuesta metodológica y aplicación práctica, Renato Vargas, Irene Alvarado, Mónica Rodríguez, Adrián Rodríguez y Paul Wander (LC/TS.2022/223), 2022.
213. Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Marina Gil Sevilla, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Elisa Blanco, Lisbeth Naranjo, Alba Llavona y Natalia Sarmanto (LC/TS.2022/193), 2022.

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

Números publicados:

- 222 Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravía Matus, Diego Fernández, Antonio Santos, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto

- 221 Oportunidades para la adopción del enfoque de cadenas de valor en el ámbito de los recursos hídricos

Elisa Blanco

- 220 Recursos naturales y desarrollo sostenible. Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe

Jeannette Sánchez y Mauricio León

