



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

EVOLUCIÓN DEL MARCO INSTITUCIONAL DEL FÓSFORO: DESDE SU RECUPERACIÓN AL CIERRE DE CICLO

Valentina Carrillo / Eduardo Holzapfel / Lorna Guerrero / Gladys Vidal



Universidad de Concepción

Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Evolución del marco institucional del fósforo: desde su recuperación al cierre del ciclo.

Valentina Carrillo, Eduardo Holzapfel, Lorna Guerrero y Gladys Vidal.
Marzo 2024.

Agradecimientos:

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

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,
Concepción, Chile
Teléfono +56-41-2661570

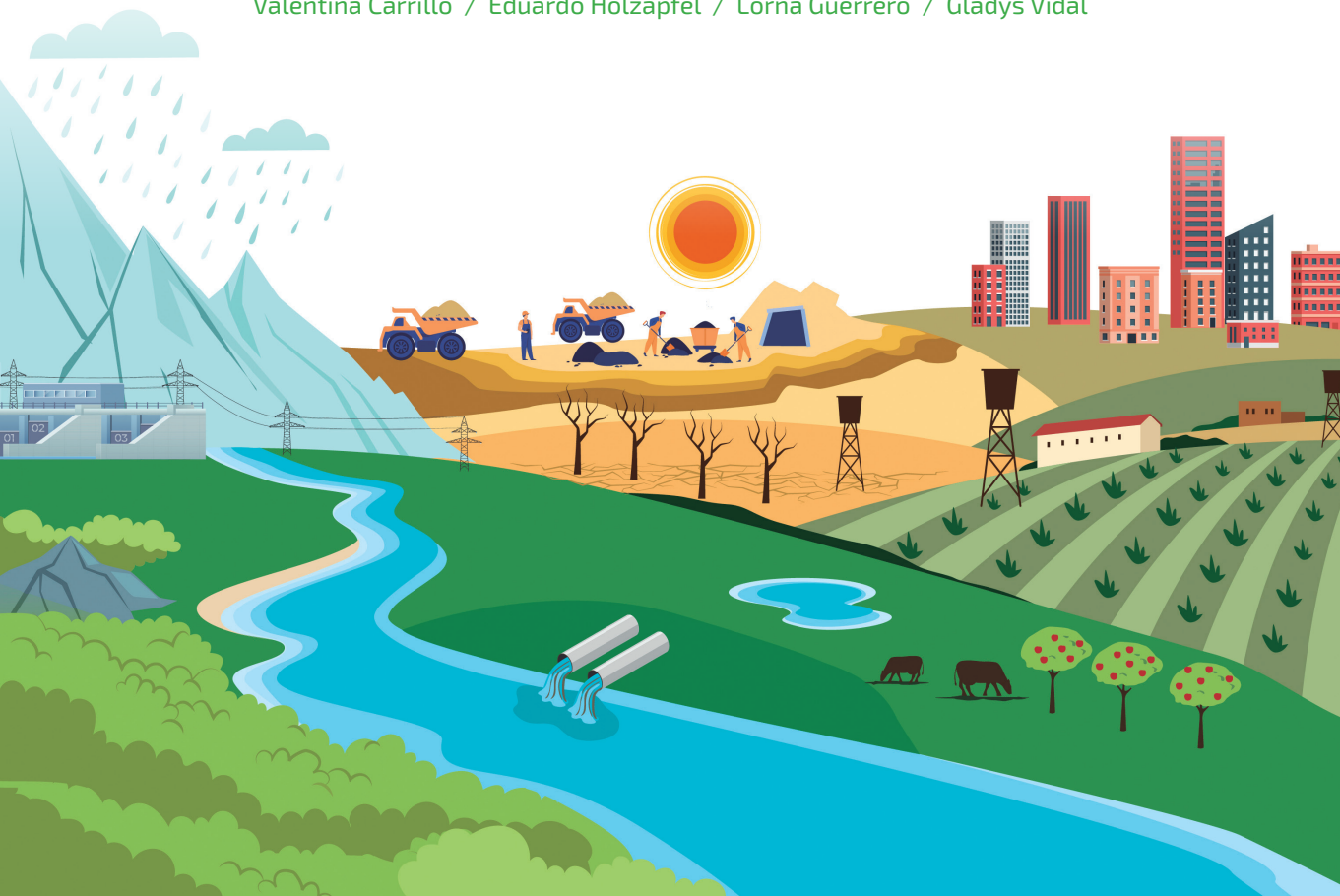
www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

EVOLUCIÓN DEL MARCO INSTITUCIONAL DEL FÓSFORO: DESDE SU RECUPERACIÓN AL CIERRE DE CICLO

Valentina Carrillo / Eduardo Holzapfel / Lorna Guerrero / Gladys Vidal



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

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

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

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

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Valentina Carrillo

Ingeniera Civil Ambiental.
Doctora en Ciencias Ambientales con mención en
Sistemas Acuáticos Continentales,
Universidad de Concepción.
Investigadora postdoctoral CRHIAM,
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental.



Eduardo Holzapfel

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



Lorna Guerrero

Doctora en Ciencias Químicas.
Programa en Biotecnología Ambiental,
Universidad Santiago de Compostela, España.
Académico Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.



Gladys Vidal

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

RESUMEN

El fósforo es parte de los macronutrientes fundamentales en la agricultura. Este se encuentra en la naturaleza en minerales fosfatados y, debido a su naturaleza finita, la escasez de fósforo es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la agricultura. Una estrategia para impulsar su recuperación y reciclaje es implementar una gestión que integre consideraciones económicas, sociales y ambientales para garantizar un desarrollo equitativo. Sin embargo, es necesario que estos objetivos estén alineados con las políticas regulatorias en distintos sectores, con la finalidad de acelerar la transición hacia la recuperación de fósforo.

La gestión integral de las aguas servidas y su tratamiento es una de las acciones claves para recuperar el fósforo utilizado en la agricultura y que ha servido de alimento para las personas. Las tecnologías de tratamiento de aguas servidas y su óptima operación son fundamentales para obtener productos de fósforo de calidad (bajo precipitados químicos, denominados estruvita). Sin embargo, existen algunas barreras en la aplicación de la economía circular de este mineral. En la actualidad, el mercado de los productos recuperados de fósforo se encuentra dentro del Plan de Acción para la Economía Circular 2020, Reglamento de fertilizantes (EC 2019/1009) y la Directiva Marco sobre Residuos (2008/98/EC) pero solo en la Unión Europea. En contraste, en América Latina, las disparidades en términos de recursos económicos y tecnológicos obstaculizan el cierre del ciclo del uso de fósforo.

Finalmente, la sociedad también desempeña un rol fundamental y la aceptación social y del consumidor es un impulsor clave para la adopción de prácticas más sostenibles de la gestión del fósforo. En este ámbito una de las barreras a sobrepasar tiene relación con la incertidumbre sobre cuestiones sanitarias y el riesgo potencial asociado a los efectos sobre la salud de la población y el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

El fósforo es esencial para la vida, debido a su papel en numerosas moléculas claves y rutas metabólicas. Se encuentra en los ácidos nucleicos (ácido desoxirribonucleico [ADN] y ácido ribonucleico [ARN]), en las moléculas de fosfolípidos de la membrana celular y en moléculas como el tri-, di- o monofosfato de adenosina (ATP, ADP o AMP), responsables de la transferencia intracelular de energía en los procesos metabólicos (Elser, 2012). Sin embargo, a pesar de su importancia, no cuenta con ningún sustituto y se trata de un recurso no renovable esencial para el desarrollo y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, acuáticos y la productividad agrícola, entre otros (Desmidt *et al.*, 2015).

La Figura 1 muestra la evolución temporal del fósforo desde su descubrimiento hasta su recuperación y reciclaje. Todo comienza en 1688, cuando Albino descubrió el fósforo en las plantas, siendo este un nutriente limitante para su crecimiento. Desde aquí en adelante comenzó la historia del fósforo con la creación de las patentes británicas para producir fertilizantes a partir de ácido sulfúrico y huesos, y posteriormente se estableció en Deptford, Inglaterra, la primera fábrica de fertilizantes del mundo (Corbridge, 2013).

De forma natural, los minerales fosfatados son las principales fuentes de fósforo y debido a su naturaleza finita, la escasez de fósforo es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la humanidad. Desde el siglo XIX las rocas fosfóricas han sido sobreexplotadas, esto impulsado en gran medida por el uso de fertilizantes, los cuales ejercen una presión cada vez mayor sobre las reservas (Withers *et al.*, 2015). La intensificación del uso de fertilizantes químicos en los suelos permitió mejorar el rendimiento de los cultivos, impulsando la Revolución Verde, que alimentó a miles de millones de personas durante la década de 1960 (Kok *et al.*, 2018). Sin embargo, esta práctica ha llevado a la producción máxima de mineral de fosfato y los recursos de fósforo económicamente extraíbles podrían agotarse dentro de los próximos 50 a 100 años (Cordell *et al.*, 2009).

Por otro lado, la aplicación de fósforo en los suelos ha aumentado hasta cuatro veces el nivel natural de este elemento en el medio ambiente, alterando el ciclo global del fósforo (Cordell y White, 2014). Como consecuencia, gran parte de este fósforo, que no es asimilado por los cultivos, se moviliza a través de la erosión, escorrentía y descargas inadecuadas de aguas servidas, llegando a las aguas superficiales y generando la eutrofización antro-

pogénica. Este exceso de nutrientes en ecosistemas acuáticos promueve el crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, lo que conduce a la disminución de los niveles de oxígeno en el agua causando la muerte de peces, y problemas relacionados con los suministros de agua, pérdida de la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos (Kok *et al.*, 2018).

La urbanización y el aumento de la población en Europa trajo consigo problemas asociados a la contaminación del agua por nutrientes, los que pronto se intensificaron. Esto provocó graves consecuencias para la salud humana, los ecosistemas y la economía. Por esto, se comenzaron a desarrollar procesos de tratamiento de aguas servidas más sofisticados que incluían la eliminación de fósforo dentro de sus tratamientos (Ashley *et al.*, 2011). De esta manera, las plantas de tratamiento de aguas servidas, que cuentan con un tratamiento terciario, pueden eliminar hasta el 99% del fósforo (Carrillo *et al.*, 2020). En 1982, con la finalidad evaluar la calidad del agua en función de la cantidad de nutrientes que estaban recibiendo los cuerpos de agua, se estableció la clasificación de condición trófica por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) diseñada para mejorar la gestión, monitoreo de nutrientes y protección de los recursos hídricos a nivel mundial (OECD, 2012).

Durante las décadas de 1990 y 2000, se observó un creciente interés por parte de gobiernos y organizaciones internacionales en abordar cuestiones relacionadas con la protección ambiental. El enfoque se centró en la prevención y control de problemáticas como la eutrofización, los suelos agrícolas, el fósforo y las aguas servidas. En este contexto, se adoptaron diversas normativas como la Directiva 91/271/CEE, la cual establece un marco para la evaluación y mejora del tratamiento de aguas servidas en los países miembros de la Unión Europea (UE). Asimismo, la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE, establece normas para detener el deterioro del estado de las masas de agua de la UE y conseguir un «buen estado» de los ríos, lagos y aguas subterráneas (Shaddel *et al.*, 2019). Simultáneamente, se implementaron normativas específicas en relación con la utilización de abonos y fertilizantes, destacando el Reglamento (CE) n.º 2003/2003, que unificó dichos elementos. Posteriormente, se fijaron restricciones para la concentración de fósforo en detergentes mediante el Reglamento (UE) n.º 259/2012. Estos reglamentos tuvieron como objetivo reducir la liberación de fósforo al medio ambiente y ecosistemas acuáticos (Kabbe *et al.*, 2017).

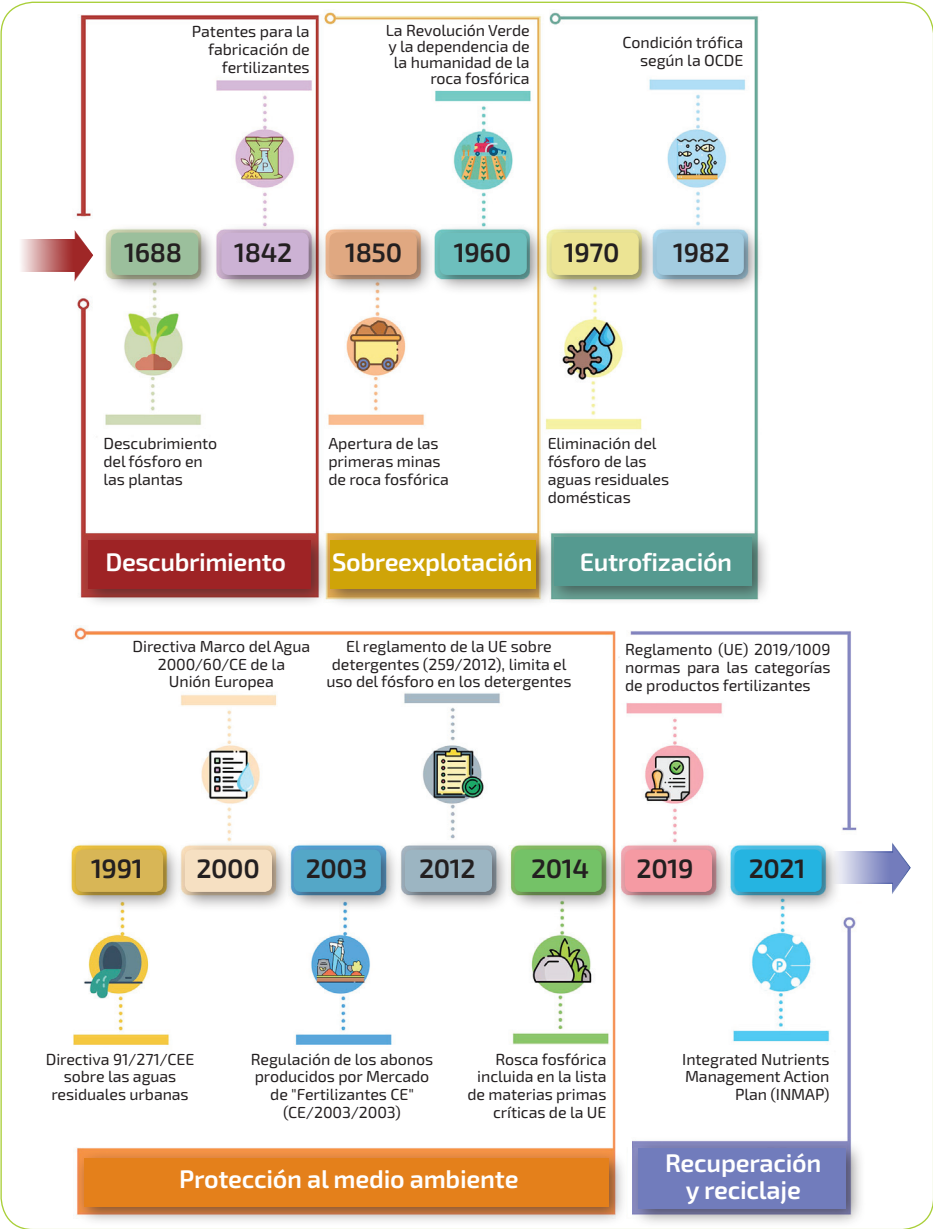


Figura 1.

Cronología de la historia del fósforo, desde su descubrimiento hasta su recuperación y reciclaje. Fuente: elaboración propia.

A pesar de que históricamente el fósforo se consideraba un contaminante y, como tal, estaba sujeto a regulaciones, en el siglo XXI se reconoció cada vez más que este mineral es un recurso escaso a nivel mundial. Por consiguiente, el nuevo enfoque propone un cambio de paradigma en el tratamiento de aguas servidas, donde nutrientes como el fósforo son reconocidos como una "materia prima valiosa" (De Boer *et al.*, 2018). Un hito importante en el ámbito del fósforo fue la reciente inclusión de la roca fosfórica en la lista de materias primas críticas de la UE (Shaddel *et al.*, 2019). El objetivo principal de esta medida es mejorar la cadena de suministro y disminuir la dependencia de las importaciones a Europa. Se espera que con esta normativa se asegure un suministro sostenible y estable de fósforo para la agricultura y otros sectores clave de la economía de la UE.

En los últimos años, ha habido un creciente interés en la recuperación de fósforo a partir de las aguas servidas. Este enfoque implica extraer el fósforo contenido en las aguas servidas para su posterior reutilización en la producción de fertilizantes, buscando así cerrar el ciclo y promover la gestión sostenible de este recurso. En este contexto, se han creado iniciativas como el reglamento 2019/1009 de la UE que tiene como objetivo garantizar que el uso de fertilizantes sea seguro para la salud humana y el medio ambiente antes de ser comercializados, promoviendo así una agricultura sostenible (EC, 2019). Asimismo, se ha establecido la Plataforma Europea del Fósforo Sostenible (ESPP) una iniciativa colaborativa que busca fomentar alianzas y prácticas sostenibles relacionadas con el reciclaje de fósforo (ESPP, 2011). Estos esfuerzos evidencian la necesidad de un enfoque más integrado y holístico en la gestión del cierre de ciclo del fósforo. Es decir, no solo debería centrarse en aspectos tecnológicos y de tratamiento, sino también en aspectos normativos, económicos, de protección ambiental y de salud pública.

MARCO INSTITUCIONAL DEL FÓSFORO

La utilización del fósforo requiere una estrategia integral para el cierre de ciclo de este elemento, permitiendo su recuperación y reutilización (Jupp *et al.*, 2021). Abordar este desafío es un proceso complejo que no admite soluciones únicas; sino que requiere la consideración de diversas motivaciones. Entre ellas, destaca la necesidad de recuperar fósforo de las aguas servidas,

impulsada por la escasa disponibilidad de fertilizantes. Así como también, la reutilización de residuos orgánicos como abono, el reciclaje de productos con contenido de fósforo, y reducir pérdidas en la utilización de fertilizantes, evitando corrientes de pérdida como la lixiviación, infiltración y escorrentía (Sarvajayakesavalu *et al.*, 2018).

El objetivo es establecer un sistema circular y sostenible para la gestión del fósforo, evitando depender de la extracción de minerales fosfatados no renovables. Para ello se necesita redefinir y rediseñar los sistemas de producción humana, por lo que aparece el concepto de "Economía Circular". Esta propuesta busca cambiar de una economía lineal a una circular, enfocándose en el reciclaje, limitación y reutilización de los insumos físicos. Además, promueve el uso de residuos como recurso, lo cual contribuye a reducir el consumo de recursos primarios (Jedelhauser y Binder, 2018). Sin embargo, a pesar de este creciente interés de transición sustentable, la pregunta sobre 'cómo funcionan' estos principios circulares en la práctica sigue abierta. En el caso del fósforo, resulta imperativo abordar cuestionamientos tales como ¿Qué tecnología utilizar y dónde recuperar el fósforo? ¿Dónde se lleva a cabo el reciclaje? ¿Quiénes se ven afectados o involucrados en este proceso?, o ¿Qué recursos se necesitan? Además, se deben evaluar los impactos y/o si estas acciones realmente contribuyen a cambios en los sistemas o estructuras ya existentes.

Este cierre de ciclo debe ser diseñado con un marco institucional adecuado, que se refiere al conjunto de leyes, normas, políticas, acuerdos, organizaciones y procesos que conforman el sistema institucional (Ahlström y Cornell, 2018). La Figura 2 muestra el marco institucional para la gestión sostenible del fósforo. Este marco propone la implementación de restricciones en las descargas de fósforo, la adopción de alternativa de tratamiento de aguas servidas que impulsen la recuperación de este nutriente, la reutilización de productos con alto contenido de fósforo, así como el establecimiento de acuerdos para el mercado de fertilizantes e imposición de límites para su aplicación en la agricultura. Estas medidas se orientan a minimizar las pérdidas de fósforo, con el objetivo de garantizar la seguridad ambiental y la protección de la salud pública.

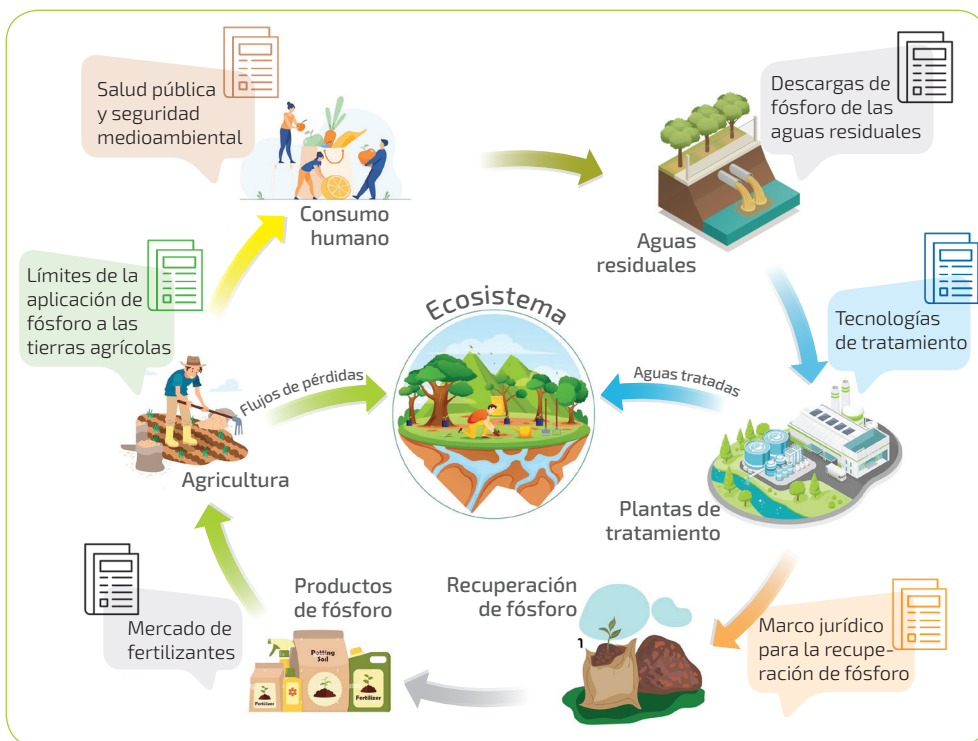


Figura 2.

Marco institucional para la gestión sostenible del ciclo de fósforo.
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la sinergia entre organizaciones es esencial para abordar de manera integral los desafíos asociados con la recuperación de fósforo. La eficacia de estas relaciones depende de una comunicación abierta y colaboración activa entre los actores involucrados. La Figura 3 presenta los actores que participan en el marco institucional de la recuperación de fósforo, destacando a actores clave como la industria y proveedores, que juegan un papel de inversores. También se incluyen los responsables de políticas públicas, encargados de mantener un equilibrio adecuado, y los consumidores, especialmente los agricultores. En el ámbito industrial, se identifican la industria minera, las industrias del sector sanitario y proveedores de nuevas tecnologías e innovaciones centradas en la optimización y recuperación de fósforo (Shaddel *et al.*, 2019; Nanda y Kansal, 2021).

En el ámbito de la agricultura, el grupo asesor de agricultores está compuesto por expertos que brindan servicios de asesoramiento sobre dosis de fertilizantes, condiciones del suelo y requisitos de cumplimiento. La industria de los fertilizantes, tanto químicos como orgánicos, también desempeña un papel fundamental en este contexto. En términos de formulación de políticas públicas, los representantes del gobierno, Organizaciones No Gubernamentales (ONG), el mundo académico y expertos investigadores asesores del gobierno colaboran para discutir, debatir y acordar acciones conjuntas. Este enfoque colaborativo asegura la coordinación institucional y contribuye a la toma de decisiones informadas y eficientes en el ámbito de la recuperación sostenible de fósforo (De Boer *et al.*, 2018; Nanda y Kansal, 2021).

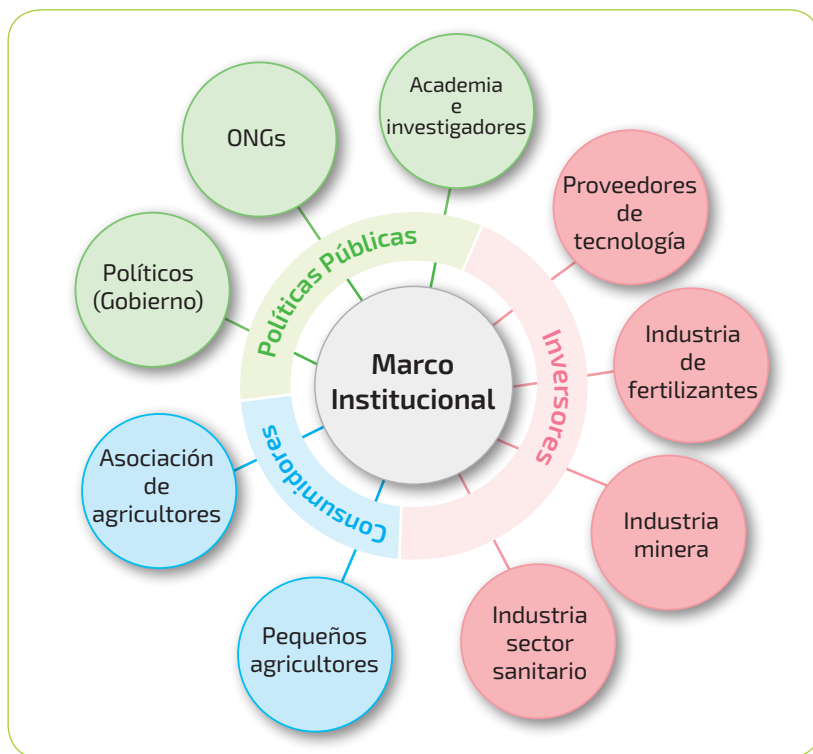


Figura 3.

Actores involucrados en el marco institucional del cierre de ciclo del fósforo.
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el marco institucional debe incluir incentivos, políticas públicas que impulsen la recuperación de fósforo en plantas de tratamientos, como subsidios, apoyos financieros o estímulos fiscales fomentando la adopción de tecnologías respaldadas por prácticas viables para obtener un producto recuperado de fósforo (De Boer *et al.*, 2018; Chrispim *et al.*, 2019; Nanda y Kansal, 2021). Sin embargo, es crucial identificar ciertos aspectos y elementos que integran el marco institucional de la recuperación de fósforo. Estos aspectos pueden actuar como impulsores o barreras para el cierre de ciclo, ya que dichas acciones desempeñan un papel fundamental en la promoción de estrategias para la recuperación de este mineral proveniente del tratamiento de aguas servidas.

ASPECTOS RELACIONADOS CON EL MARCO INSTITUCIONAL DE LA RECUPERACIÓN DE FÓSFORO

Para profundizar en este marco institucional, es esencial considerar ciertos aspectos que abarcan dimensiones regulatorias, económicas, técnicas y sociales. Cada una de estas dimensiones desempeña un rol fundamental en la formación y el funcionamiento de los mercados, contribuyendo de manera holística a todas las partes del marco institucional del fósforo. A continuación, se proporciona un análisis detallado por cada uno de los aspectos:

Aspectos regulatorios

Las políticas regulatorias esperadas pueden acelerar la transición hacia una recuperación y un reciclaje más integrales en el futuro. La Tabla 1 presenta los aspectos regulatorios relacionados con el marco institucional de la recuperación de fósforo en tratamientos de aguas servidas. La legislación es uno de los elementos fundamentales para impulsar el cierre de ciclo. Estos marcos normativos determinan estándares de calidad, derechos, directrices, prácticas y manejo de riesgos para la salud. Específicamente, la legislación ambiental es un factor clave en la gestión de residuos y la prevención de la contaminación de recursos hídricos influyendo directamente en las prácticas de recuperación de fósforo. Uno de los principales impulsores que promovió la recuperación de fósforo fue el aumento de los niveles de contaminación de agua, lo cual generó una creciente atención hacia la implementación de normas legales estableciendo requisitos y estándares para el tratamiento de aguas servidas (Sarvajayakesavalu *et al.*, 2018).

Tabla 1.

Aspectos regulatorios relacionados con el marco institucional del cierre de ciclo del fósforo.

Aspectos regulatorios	Elementos	Impulsores	Barreras
Regulaciones	Legislaciones ambientales, mercado y calidad del producto	Homogenización de las normativas Certificaciones, clasificaciones y límites permisibles	Largos procesos de legalización e implementación Supervisión y control
	Objetivos de sostenibilidad	Intereses políticos con enfoque en la sostenibilidad	Poca coherencia entre legislaciones
Instituciones	Ministerios, organización o plataformas	Cooperación entre los actores involucrados	Falta de enfoque integrado
		Creación de redes	Estructura existente

Otra legislación, que es crucial que exista, es la normalización de un mercado óptimo de los recursos recuperados de fósforo, especialmente para su utilización como fertilizantes. Esta legislación debe respaldar las acciones de recuperación de este recurso, facilitando así una transición segura y regulada hacia un enfoque más sostenible en la gestión de nutrientes (Barquet *et al.*, 2020). En la actualidad, el mercado de los productos recuperados de fósforo se encuentra dentro del Plan de acción para la economía circular 2020, Reglamento de fertilizantes (EC 2019/1009) y la Directiva marco sobre residuos (2008/98/EC) pero solo en la Unión Europea (UE). Estas directivas establecen los criterios de Fin de Condición de Residuo (End-Of-Waste, EoW) que deben cumplirse para dejar de ser considerado un residuo y convertirse en un producto a partir de materiales recuperados (Hukari *et al.*, 2016). Sin embargo, una de las barreras identificadas es la nueva etiqueta de fertilizante UE, cuyo proceso podría extenderse entre 7 y 10 años y carece de una supervisión adecuada. Esta nueva etiqueta debe asegurar la calidad y la seguridad de la salud pública, con el objetivo de reducir los riesgos asociados con la reutilización de estos recursos, como se describe en estudios previos (De Boer *et al.*, 2018; Shaddel *et al.*, 2019).

Una estrategia para impulsar la recuperación y reciclaje de fósforo es sostener una perspectiva desde la sostenibilidad, que busca integrar consideraciones económicas, sociales y ambientales para un desarrollo equitativo. Estas políticas buscan abordar los desafíos actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (De Boer *et al.*, 2018). Sin embargo, para acelerar la transición hacia la recuperación de fósforo, es crucial alinear estos objetivos con las políticas regulatorias en diversos sectores. Por ejemplo, las normativas relacionadas con el ciclo de fósforo a menudo están enmarcadas dentro de leyes y ministerios medio ambientales, de protección contra la contaminación a entornos naturales y gestión de sus recursos. Aunque este enfoque es más amplio, su alcance resulta superficial al no profundizar exhaustivamente en cada elemento (Carrillo *et al.*, 2024). En consecuencia, se requieren leyes o ministerios más específicos que otorguen un énfasis renovado y estén interrelacionadas, ejecutando una gestión integral y eficaz.

Definitivamente, es esencial contar con instituciones u organizaciones que desempeñen roles clave en la regulación, gestión y promoción de prácticas sostenibles para la recuperación de fósforo. Algunas de las principales organizaciones que trabajan en este marco son la Plataforma Europea del Fósforo Sostenible (ESPP), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), la Comisión Europea (EC), la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). En cuanto a acuerdos internacionales es importante mencionar a la Convención de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica, Asociación Mundial para la Gestión de Nutrientes de la UNEP y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que incluyen metas relacionadas con la gestión sostenibilidad ambiental, social y económica a nivel global (Ahlström y Cornell, 2018; Garske *et al.*, 2020; Nanda y Kansal, 2021).

Aspectos económicos

Las principales barreras en la economía circular del fósforo se encuentran en el mercado de los recursos recuperados de este mineral y en la viabilidad económica. En la Tabla 2 se resumen los elementos económicos que impulsan el cierre de ciclo. El mercado de fertilizantes destinado al cierre de ciclo de fósforo presenta una faceta esencial para promover la sostenibilidad. La

creación de un negocio competitivo en torno a los subproductos de las aguas servidas es imperativa, dado que la dinámica de la oferta y demanda suele determinar precios y cantidades de manera más eficiente (Chrispim *et al.*, 2019).

Tabla 2.
Aspectos económicos relacionados con el marco institucional del cierre de ciclo del fósforo.

Aspectos económicos	Elementos	Impulsores	Barreras
Mercado	Creación de un negocio de subproductos	Implantación de la estruvita en nichos de mercado	Falta de armonización de requisitos legales de los productos
	Atracción de inversores	Rutas económicas	Problemas de transportes
Viabilidad	Herramientas financieras	Fomento de la economía circular	Bajo precio del mineral fosfato
	Relación coste-beneficio	Incentivos políticos	Tensiones geopolíticas
		Etiquetas verdes (sostenibles)	Incertidumbre de la inversión
			Mercados conservadores y rígidos

En el contexto específico del mercado de fertilizantes, la viabilidad económica se ve influenciada significativamente por el bajo costo de los fertilizantes convencionales. Esto adquiere una relevancia particular, especialmente en relación con los costos de producción asociados a la recuperación de fósforo en las plantas de tratamiento. Por consiguiente, los costos representan un criterio crucial a considerar al analizar la implementación de tecnologías en este ámbito (De Boer *et al.*, 2018; Shaddel *et al.*, 2019).

Además del mercado, resulta fundamental contar con incentivos económicos que estimulen la inversión en investigación y desarrollo. Tanto la inversión pública como privada en tecnologías es esencial para perfeccionar los métodos de recuperación de fósforo, haciéndolos más eficiente desde el punto de vista económico. En este contexto, recae en la academia la responsabilidad de acercar la innovación a la población y transformar un mercado que tiende a ser rígido y conservado. Impulsar la participación de nuevos inversores y otorgar credibilidad y seguridad a un mercado sostenible, por

ejemplo, mediante la adopción de etiquetas verdes, surge como un componente clave en este proceso de cambio y mejora (Smol, 2019).

Aspectos técnicos

En el ámbito de la recuperación de fósforo, varios aspectos técnicos juegan un papel crucial, con impulsores y barreras que deben abordarse estratégicamente. La Tabla 3 resume los elementos técnicos para el cierre de ciclo del fósforo. En términos de tecnologías, la innovación en los tratamientos representa un impulsor significativo. La eficiencia en estos procesos, con la estruvita como un producto de calidad, puede reducir costos químicos y aportar una fuente alternativa y renovable de fósforo. Sin embargo, se enfrenta a desafíos como la baja solubilidad y características químicas específicas, así como la necesidad de adaptar tecnologías a pequeña escala (De Boer *et al.*, 2018; Chrispim *et al.*, 2019).

Tabla 3.
Aspectos técnicos relacionados con el marco institucional del cierre de ciclo del fósforo.

Aspectos técnicos	Elementos	Impulsores	Barreras
Tecnologías	Innovación en tecnologías de tratamientos	Prevención de incrustaciones incontroladas	Costos de implementación y operación
	Eficiencia en los tratamientos	Estruvita como producto de buena calidad Reducción de costos en productos químicos	Baja solubilidad y características químicas Tecnologías a pequeñas escalas
Infraestructuras	Plantas de tratamientos con recuperación	Desarrollo de soluciones para plantas de tratamientos aplicables al contexto local y regional	Disponibilidad de espacio Falta de personal especializado Rentabilidad de infraestructuras
Ambiental	Tratamiento y tecnologías de recuperación	Gestión de residuos y aguas servidas Protección de las aguas superficiales Fuente alternativa y renovable de fósforo	Subproductos y contaminantes Bajo rendimiento de tratamiento Dependencia del mineral fósforo

En cuanto a infraestructuras, el impulso se encuentra en el desarrollo de soluciones aplicables a nivel local y regional, con plantas de tratamiento que incorporen la recuperación de fósforo. No obstante, se enfrentan a barreras como la falta de espacio disponible, la escasez de personal especializado y la evaluación de la rentabilidad de estas infraestructuras. Desde una perspectiva ambiental, el tratamiento y las tecnologías de recuperación buscan gestionar residuos y aguas servidas de manera más sostenible. La protección de aguas superficiales y la búsqueda de fuentes alternativas y renovables de fósforo son impulsadas por la conciencia ambiental. Sin embargo, enfrentan barreras y preocupaciones como la generación de subproductos y contaminantes, así como el bajo rendimiento de ciertos métodos de tratamiento, como en la estruvita (De Boer *et al.*, 2018; Smol, 2019).

Aspectos sociales

En el ámbito social de la recuperación de fósforo, diversos aspectos inciden en la implementación exitosa de estrategias, ya que debe haber una conexión entre todos los actores involucrados. La Tabla 4 resume los elementos sociales para el cierre de ciclo de recuperación de fósforo. En el ámbito educativo, los estudios de investigación y la financiación de proyectos de investigación y desarrollo (I+D) son impulsores cruciales que fomentan la generación de conocimiento. La promoción de un enfoque de pensamiento sistémico interdisciplinario mediante diversas actividades de sensibilización y una estrecha colaboración con las partes interesadas locales; enseñar sobre mejores prácticas de gestión del uso sostenible del fósforo entre los marcos locales son elementos sociales claves para fomentar el pensamiento circular de fósforo (Smol, 2019).

Tabla 4.

Aspectos sociales relacionados con el marco institucional del cierre de ciclo del fósforo.

Aspectos sociales	Elementos	Impulsores	Barreras
Educación	Estudios de investigación	Financiamiento a proyectos o investigaciones (I+D)	Falta de información y conocimiento
	Mejores prácticas de gestión	Seminarios o talleres en relación con fósforo	Falta del enfoque de ciclo de vida
	Informes técnicos		
Población	Aceptación social y del consumidor	Interés común entre los actores	Desconocimiento de subproductos de fósforo
	Percepción y perspectivas de los actores	Interdisciplina entre los actores	Incertidumbre entre actores
Salud	Evaluaciones de riesgos	Estudios sobre contaminantes orgánicos, metales pesados y patógenos	Riesgo sobre los efectos sobre la salud
	Programas de monitoreo	Seguimiento del fósforo	Incertidumbre sobre cuestiones sanitarias

La población desempeña un papel fundamental, y la aceptación social y del consumidor es un impulsor clave para la adopción de prácticas más sostenibles. La realización de seminarios, talleres y la disponibilidad de informes técnicos contribuyen a la promoción de mejores prácticas de gestión. Sin embargo, la carencia de conocimiento acerca de los subproductos de fósforo emerge como una barrera significativa, impactando la percepción y perspectivas de los actores involucrados y generando incertidumbre entre ellos. La población en general se encuentra confrontada con la escasez de información y un conocimiento generalizado sobre este tema. Por lo tanto, se genera una opinión negativa debido a las incertidumbres en cuestiones de salud; preocupación de agricultores y conciencia entre los actores (Chrispim *et al.*, 2019).

Las evaluaciones de riesgos y los estudios sobre la salud, contaminantes orgánicos, metales pesados y patógenos son impulsados por la preocupación por posibles efectos sobre la salud. La implementación de programas de monitoreo, especialmente en relación con el fósforo, contribuyen a abordar estas preocupaciones. No obstante, las barreras incluyen la incertidumbre sobre cuestiones sanitarias y el riesgo potencial asociado a los efectos sobre la salud, lo que requiere una gestión cuidadosa (De Boer *et al.*, 2018; Smol, 2019).

Marco institucional de fósforo en el mundo

El marco institucional relacionado con el fósforo a nivel mundial es diverso y abarca una variedad de aspectos, desde regulaciones medioambientales hasta iniciativas de gestión sostenible. La Figura 4 muestra el nivel de progreso en diferentes regiones geográficas en cuanto a la aplicación de un marco institucional para la recuperación de fósforo de las aguas servidas. Este marco institucional incluye la instalación y el funcionamiento de plantas de tratamiento eficientes destinadas a la recuperación de fósforo, el establecimiento de normas estrictas para el fósforo en relación con el vertido de aguas tratadas (menor a 1 mg fósforo/L), la aplicación de planes y reglamentos no legales relacionados con la recuperación, las normas de reciclado y la aplicación terrestre de fósforo.

En términos generales, Europa se considera la región más avanzada en estas cuestiones, destacando países como Alemania, Países Bajos, Suiza, Austria y Dinamarca. Estos países dan prioridad a políticas y leyes estrictas de economía circular, teniendo un enfoque integral de la gestión de los recursos hídricos, con estrategias más amplias relacionadas con la recuperación de nutrientes y la agricultura sostenible. Además, en Europa enfatizan la colaboración y comunicación entre actores políticos, inversores y consumidores desarrollando tecnologías y prácticas sostenibles a través de la innovación (Carrillo *et al.*, 2024).

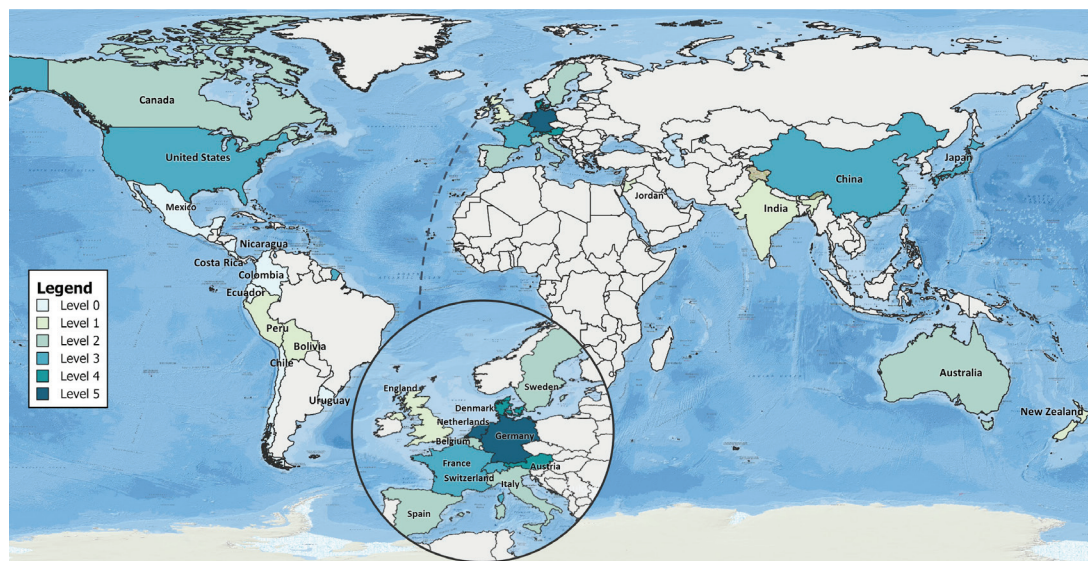


Figura 4.

Nivel de desarrollo del marco institucional para la recuperación de fósforo de las aguas servidas en diferentes regiones geográficas, siendo 0 el nivel más bajo y 5 el nivel más avanzado. Fuente: elaboración propia.

En otras partes del mundo, países como Estados Unidos, China y Japón han impulsado el cierre de ciclo del fósforo mediante el funcionamiento eficaz de una planta de tratamiento de aguas servidas, tecnologías eficientes y planes nacionales. Además, destacan en políticas medioambientales, abordando la contaminación del agua, la gestión de residuos y las prácticas sostenibles (Carrillo *et al.*, 2024). En el caso de América Latina y el Caribe, se presenta una situación de escasos avances en el tratamiento y recuperación de las aguas servidas y de los nutrientes como el fósforo contenido en ellas. Pese a los avances en la cobertura de los sistemas de agua potable y saneamiento en las últimas décadas (WHO, 2018), la región presenta un contexto jurídico e institucional poco favorable a la innovación, con un marco regulatorio débil, objetivos poco claros e insuficiente asignación de recursos para la introducción de nuevos mecanismos (De la Peña *et al.*, 2022).

Los diagnósticos regionales señalan problemas en el funcionamiento del sistema y falta de perspectiva a mediano y largo plazo debido a la inestabilidad política. Factores como la falta de responsabilidad en el sector del tratamiento de aguas servidas y las desiguales capacidades tecnológicas y de capital humano, dificultan la formulación de políticas claras para el tratamiento y reúso de aguas servidas en América Latina y Caribe. El avance en la implementación de mecanismos de tratamiento en las aguas servidas ha operado de manera desigual en la región, con países con coberturas inferiores al 50% (como en el caso de Perú, Colombia y Brasil) y otros superiores al 90% (como en el caso de Chile y Uruguay) (Donoso y Sanin 2020). En cuanto a las tecnologías de tratamiento de aguas servidas más utilizadas en los países de América Latina y Caribe son las lagunas de estabilización (38%), los lodos activados (26%) y los reactores de manto de lodos anaerobios de flujo ascendente (17%), que representan el 81% de las instalaciones de tratamiento. Se sugiere que los lodos activados podrían ser una opción para la recuperación de fósforo en la fase líquida del licor de deshidratación de lodos. Sin embargo, en el caso de las plantas de lagunas de estabilización, esta opción no sería adecuada debido a su inestabilidad y a la variabilidad climatológica de la región (Chispim *et al.*, 2019).

Los países con menor cobertura de servicios de agua potable y tratamiento de aguas servidas tienen dificultades estructurales para dirigir recursos y tecnologías para la gestión adecuada de los nutrientes y particularmente el fósforo. Para fomentar esta actividad, se requiere no solo regulaciones claras, sino también políticas de estado a largo plazo que incorporen los recursos y reformas institucionales necesarios. La autonomía del sector de gestión de aguas servidas tratadas y, la existencia de organismos locales, son elementos cruciales en este contexto institucional para avanzar en la recuperación de nutrientes en la región de América Latina y Caribe (De la Peña *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

El marco institucional para la regulación de fósforo tiene un desarrollo distinto y depende de los avances en las regulaciones ambientales de los distintos continentes del mundo. En primer lugar, se destaca la falta de una estructura institucional común que respalde explícitamente las economías circulares y que regule la reutilización del fósforo contenido en las aguas servidas. En segundo lugar, la carencia de un objetivo gubernamental unificado, especialmente en términos de protección ambiental y regulación de recursos hídricos, agrega complejidad. Además, las disparidades en términos de recursos económicos y tecnológicos, en naciones menos desarrolladas como por ejemplo América Latina, ralentiza el cierre del ciclo del uso de fósforo. En contraste, los países con una innovación tecnológica avanzada presentan mejores perspectivas para desarrollar sistemas de recuperación y reutilización de nutrientes.

Debido a lo antes indicado, las regiones geográficas que trabajan por el desarrollo sostenible de sus territorios propician una economía verde que busca una gestión eficiente del fósforo en los sistemas productivos y en el tratamiento de las aguas servidas. El cierre del ciclo del fósforo, a través del reciclaje, contribuye a la preservación de los servicios de los ecosistemas. Debido a esto, las inversiones verdes no solo crean oportunidades económicas, sino que también generan un impacto positivo en el medio ambiente y la calidad de vida de las comunidades.

REFERENCIAS

- Ahlström H., Cornell, S.E. 2018. Governance, polycentricity and the global nitrogen and phosphorus cycles. *Environmental Science & Policy*, 79, 54-65.
- Ashley K., Cordell D., Mavinic D. 2011. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, 84(6), 737-746.
- Barquet K., Järnberg L., Rosemarin A., Macura B. 2020. Identifying barriers and opportunities for a circular phosphorus economy in the Baltic Sea region. *Water Research*, 171, 115433.
- Carrillo V., Castillo R., Magrí A., Holzapfel E., Vidal G. 2024. Phosphorus recovery from domestic wastewater: A review of the institutional framework. *Journal of Environmental Management*, 351, 119812.
- Carrillo V., Fuentes B., Gómez G., Vidal, G. 2020. Characterization and recovery of phosphorus from wastewater by combined technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 389-418.
- Chrispim M.C., Scholz M., Nolasco M.A. 2019. Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*, 248, 109268.
- Corbridge D.E.C. 2013. Phosphorus, Chemistry, Biochemistry and Technology. 6th Ed., Boca Raton.
- Cordell D., White S. 2014. Life's bottleneck: sustaining the world's phosphorus for a food secure future. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 161-188.
- Cordell D., Drangert J.O., White S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292-305.
- De Boer M.A., Romeo-Hall A.G., Rooimans T.M., Slootweg J.C. 2018. An assessment of the drivers and barriers for the deployment of urban phosphorus recovery technologies: A case study of the Netherlands. *Sustainability*, 10(6), 1790.

- De la Peña M.E., Larrea C.J., Sasaki K., Smith D. 2022. El Reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe: 10 estudios de caso. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). IDB-TN-2567.
- Desmidt E., Ghyselbrecht K., Zhang Y., Pinoy L., Van der Bruggen B., Verstraete W., Meesschaert B. 2015. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336-384.
- Donoso G, Sanin M. 2020. Análisis crítico de las políticas aplicadas en Latinoamérica en el sector agua y saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) p. 42.
- Elser J.J. 2012. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? *Current Opinion in Biotechnology*, 23(6), 833-838.
- European Council. 2019. Reglamento (UE) 2019/1009, por el que se establecen normas sobre la comercialización de productos fertilizantes de la UE y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 1069/2009 y (CE) n.º 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) n.º 2003/2003. Brussels, Belgium.
- European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP). 2011. Input to the public consultation on the future of the Common Agricultural Policy. Disponible en https://ec.europa.eu/agriculture/consultations/cap-modernising/2017_en
- Garske B., Stubenrauch J., Ekardt F. 2020. Sustainable phosphorus management in European agricultural and environmental law. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 29(1), 107-117.
- Hukari S., Hermann L., Nättorp A. 2016. From wastewater to fertilisers—Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. *Science of the Total Environment*, 542, 1127-1135.
- Jedelhauser M., Binder C.R. 2018. The spatial impact of socio-technical transitions—The case of phosphorus recycling as a pilot of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 197, 856-869.
- Jupp A.R., Beijer S., Narain G.C., Schipper W., Slootweg J.C. 2021. Phosphorus recovery and recycling—closing the loop. *Chemical Society Reviews*, 50(1), 87-101.

- Kabbe C. 2017. Overview of phosphorus recovery from the wastewater stream facilities operating or under construction. In P-REX - European Sustainable Phosphorus Platform. Disponible en: https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_Tech_implementation-Table_20170208.pdf (acceso diciembre 12, 2023).
- Kok D.J.D., Pande S., Van Lier J.B., Ortigara A.R., Savenije H., Uhlenbrook S. 2018. Global phosphorus recovery from wastewater for agricultural reuse. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5781-5799.
- Nanda M., Kansal A. 2021. Pathways for sustainable phosphorus loop in Germany: Key lessons from stakeholders' perspectives. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100062.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). 2012. Environmental Outlook to 2050. The Consequences of Inaction. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Sarvajayakesavalu S., Lu Y., Withers P.J., Pavinato P.S., Pan G., Chareonsudjai P. 2018. Phosphorus recovery: a need for an integrated approach. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(2), 48-57.
- Shaddel S., Bakhtiary-Davijany H., Kabbe C., Dadgar F., Østerhus S.W. 2019. Sustainable sewage sludge management: From current practices to emerging nutrient recovery technologies. *Sustainability*, 11(12), 3435.
- Smol M. 2019. The importance of sustainable phosphorus management in the circular economy (CE) model: the Polish case study. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21, 227-238.
- Withers P.J., Elser J.J., Hilton J., Ohtake H., Schipper W.J., Van Dijk K.C. 2015. Greening the global phosphorus cycle: how green chemistry can help achieve planetary fósforo sustainability. *Green Chemistry*, 17(4), 2087-2099.
- World Health Organization (WHO). 2018. Guidelines on Sanitation and Health. Ginebra, Switzerland. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/274939/9789241514705-eng.pdf>.



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

EVOLUCIÓN DEL MARCO INSTITUCIONAL PARA LA REGULACIÓN DE FÓSFORO: DESDE SU DESCARGA A ECOSISTEMAS A LA RECUPERACIÓN DESDE AGUAS SERVIDAS PARA EL CIERRE DEL CICLO DEL MINERAL



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

