



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

ESTRUVITA: FUENTE RECICLADA DE FÓSFORO OBTENIDA DE AGUAS RESIDUALES

Valentina Carrillo / Dafne Crutchik / Eduardo Holzapfel / Yves Lesty / Gladys Vidal



Universidad de Concepción

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:

Estruvita: fuente reciclada de fósforo obtenida de aguas residuales.

Valentina Carrillo, Dafne Crutchik, Eduardo Holzapfel,

Yves Lesty y Gladys Vidal.

Juio 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

ESTRUVITA: FUENTE RECICLADA DE FÓSFORO OBTENIDA DE AGUAS RESIDUALES

Valentina Carrillo / Dafne Crutchik / Eduardo Holzapfel / Yves Lesty / 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.



Dafne Crutchik

Doctora en Ingeniería Química y Ambiental,
Universidad de Santiago de Compostela, España.
Profesora Asociada, Facultad de Ingeniería y Ciencias,
Universidad Adolfo Ibáñez.



Eduardo Holzapfel

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



Yves Lesty

Magister en ciencias en Ingeniería Bioquímica,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
Gerente de Procesos y Redes,
Aguas Andinas S.A.



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 un recurso no renovable esencial para la vida y la agricultura, pero su sobreexplotación para la producción de fertilizantes ha agotado las reservas de roca fosfórica. Al mismo tiempo, este exceso de nutrientes en el ecosistema causa eutrofización en cuerpos de agua. La recuperación de fósforo en aguas servidas es crucial para prevenir la eutrofización, mejorar la eficiencia operativa y cumplir con normativas ambientales. La precipitación de estruvita, un compuesto cristalino de fosfato de amonio y magnesio es una solución efectiva. La estruvita se forma espontáneamente como incrustaciones en algunas plantas de tratamiento de aguas servidas y puede usarse como fertilizante debido a su baja concentración de agua y metales pesados. Europa lidera en número de instalaciones a gran escala que producen estruvita, aunque América del Norte recupera mayores volúmenes. Algunos productos de estruvitas que ya se encuentran en el mercado son Crystal Green®, NuReSys®, Phosphogreen™, STRUVIA. Implementar tecnologías y estrategias efectivas para la recuperación y eliminación del fósforo es fundamental para aprovechar este recurso de manera sostenible y minimizar su impacto ambiental negativo.

INTRODUCCIÓN

El fósforo es un recurso esencial para el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, es crucial para la producción de alimentos y agricultura. Sin embargo, este nutriente se extrae de un recurso no renovable, la roca fosfórica, que podría previsiblemente agotarse dentro de las próximas décadas (Desmidt *et al.*, 2015). El fósforo extraído de la roca fosfórica se utiliza principalmente para la fabricación de los fertilizantes fosfatados. Sin embargo, las mayores reservas de roca fosfórica del mundo se encuentran ubicadas en unos cuantos países, y en consecuencia, se encuentran sujetas a la influencia de políticas internacionales (Gutiérrez-Moya *et al.*, 2023). Las principales reservas se concentran en Marruecos, China, Argelia, Egipto, Túnez, Rusia, Brasil y Sudáfrica (Jasinski, 2024). Donde Marruecos y el desierto de Sahara tienen la mayor reserva de roca fosfórica en todo el mundo (70%) (Desmidt *et al.*, 2015).

Se ha estimado que la demanda de fósforo aumente entre 50 a 100% para el año 2050 (Cordell *et al.*, 2009). En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura afirma que la demanda de fósforo para el uso de fertilizante ha aumentado 10,39% en el periodo 2016-2022 (FAO, 2022). Mientras que la Asociación Internacional de Fertilizantes afirma que Asia liderará la expansión de la demanda en uso de fertilizantes a nivel mundial, seguido por América Latina y África (IFA, 2020). Sin embargo, el balance potencial (Oferta - Demanda) de la producción y del uso de fertilizantes fosfatados en las distintas regiones del mundo muestra que Asia y América Latina proyectan una profundización del déficit entre demanda y oferta. Mientras que África aumenta su excedente, con un aumento de su oferta superior al aumento de su consumo (ver Figura 1).

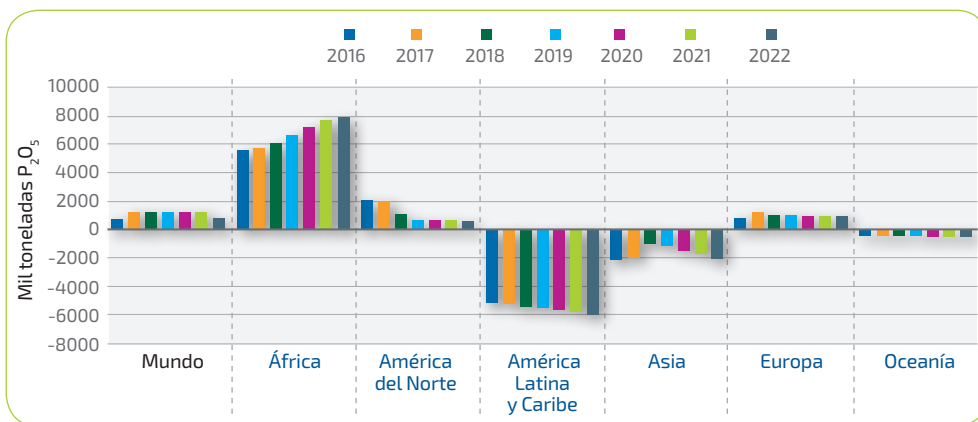


Figura 1.

Balance potencial de fósforo (a base de ácido fosfórico, P_2O_5) en los años 2016-2022 para el mundo y por región. Balance potencial (P) = oferta - demanda (usos de fertilizantes). Fuente: FAO, (2022).

La producción de fertilizantes de fósforo es inferior a la demanda en América Latina y el Caribe debido, principalmente, a que no se cuenta con grandes reservas minerales de fósforo, y que la agricultura es una actividad importante en esta región del mundo. Esto indica que se trata de un recurso muy importante, y que se está volviendo escaso en esta región (Chrispim *et al.*, 2019). Además, algunos países como China (con un 20% de la población mundial, pero solo un 10% de las tierras cultivables) tienen fuertes intereses en el acceso a nuevas fuentes de fertilizantes a un precio razonable (Gutiérrez-Moya *et al.*, 2023). En tanto, Europa presenta una tendencia a la falta de este recurso debido a que no tiene minas de fósforo y depende, en gran medida, de la importación de este mineral (Smol, 2019).

Una preocupación ambiental adicional asociada con el uso intensivo de los fertilizantes es que gran parte del fósforo no es absorbida por los cultivos. Esto ocasiona que el fósforo se movilice a través de la erosión del suelo o la escorrentía hacia los cuerpos de agua, lo que puede desencadenar en la eutrofización en los ecosistemas acuáticos (Kok *et al.*, 2018). La eutrofización es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, causando un crecimiento descontrolado de algas y, en consecuencia, una disminución del oxígeno en el agua, lo que daña el ecosistema acuático (Smith *et al.*, 2006).

Esta misma preocupación por la eutrofización existe para la descarga de las Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas (PTAS), a los cuerpos de agua receptores. Si bien el tratamiento convencional de las aguas servidas por lodos activados genera una remoción de fósforo por asimilación en el lodo en exceso formado, las concentraciones en las aguas servidas exceden esta fracción removible. Eso ha hecho que se incorpore el elemento fósforo en la lista de compuestos a remover para las PTAS que vierten a cauces sensibles a su presencia.

En la última década, ha habido un creciente interés en la recuperación de este fósforo removido de las aguas servidas. Para las plantas de menor tamaño, los tratamientos aplicados (defosfatación biológica, físico química o mixta) conducen a producir un lodo en exceso enriquecido en fósforo. Para las plantas más grandes, que cuentan con un dispositivo de digestión anaeróbica, existe la posibilidad de desarrollar una estrategia más prometedora con la precipitación del fósforo en forma de estruvita, la cual puede ser posteriormente utilizada como fertilizante u otros fines (Peng *et al.*, 2018). Por lo tanto, las PTAS son cruciales para implementar tecnologías de recuperación de fósforo, lo que no solo ayuda a mitigar impactos ambientales en cuerpos de agua, sino también a abordar la escasez de nutrientes en suelos agrícolas, promoviendo la seguridad alimentaria y la conservación de recursos naturales.

RECUPERACIÓN DE FÓSFORO EN PLANTAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS SERVIDAS

En el marco del desarrollo sustentable, las PTAS están actualmente cambiando de paradigma desde la economía lineal (consumo de energía, consumo de reactivos y producción de desechos para tratar las aguas servidas) a la economía circular. Esta nueva orientación se enfoca en la producción de recursos a través de la revalorización del agua tratada, el aprovechamiento de la energía contenida en la materia orgánica mediante la producción de biogás y la recuperación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Se estima que el contenido total de fósforo en las aguas servidas a nivel mundial podría cubrir entre un 15 y un 22% de la demanda global de este recurso (Cordell *et al.*, 2009; Chrispim *et al.*, 2019). Aun así, según la Organización Mundial de la Salud, solo el 75% de las normas nacionales de descargas de

aguas servidas en distintos países incluyen el fósforo como uno de los contaminantes a monitorear (OMS, 2018). Además, cuando lo incluyen, lo hacen con la visión del impacto sobre la eutrofización, no con la visión de generación de recursos. Es así que, muchas PTAS de gran capacidad, solo recuperan el fósforo asimilado en sus lodos por descargar sus aguas tratadas en zonas no sensibles a la eutrofización.

Una de las primeras formas en que se abordó este problema, a mediados del siglo XX, fue a través de la recuperación de fósforo en lodos sanitarios. El fósforo se acumulaba en los lodos, que luego se aplicaban directamente en tierras agrícolas. Posteriormente, a mediados de la década de 1970, se comenzó a recuperar fósforo de las aguas servidas, inicialmente bajo el concepto de eliminación de fósforo, utilizando tecnologías como la precipitación química y la eliminación biológica de fósforo. Una de las primeras experiencias a gran escala fue llevada a cabo en la PTAS de Seneca Falls en Nueva York, Estados Unidos (1973). Donde se implementó una alternativa rentable de eliminación biológica-química del fósforo (Levin y Della, 1987).

Sin embargo, no fue hasta finales de la década de 1990 cuando comenzó a introducirse el concepto de la recuperación de fósforo como una parte integral del tratamiento de las aguas servidas. La evolución del número de PTAS con recuperación de fósforo hasta el año 2023 a escala real se muestra en la Figura 2. Cabe señalar que el número de instalaciones a gran escala que incorporaron la recuperación de fósforo, experimentó un auge durante la década del 2000, siendo este aproximadamente cinco veces superior que en los años 90. Mientras que, en la última década, este número se ha triplicado, pasando de 28 instalaciones en 2010 a 87 instalaciones en 2023.

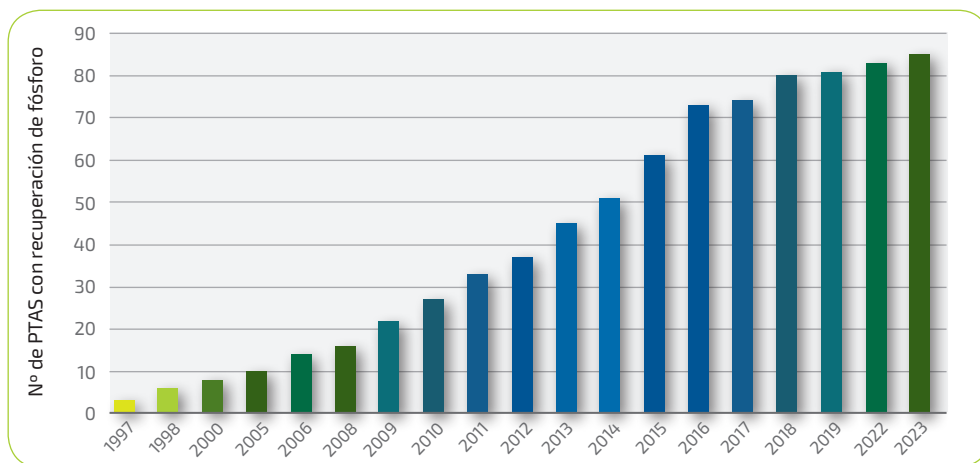


Figura 2.

Numero de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) con recuperación de fósforo desde el año 1997 hasta el 2023. Fuente: Egle *et al.*, (2015); Kabbe, (2017); Shaddel *et al.*, (2019).

Los primeros países en implementar la recuperación de fósforo en las aguas servidas fueron Austria, Alemania, Estados Unidos y Japón antes del 2000. Estos países han estado a la vanguardia en la implementación de tecnologías innovadoras para recuperar fósforo de las aguas servidas hasta el día de hoy. La Figura 3 muestra las PTAS operativas para la recuperación de fósforo en distintas partes del mundo. Europa destaca como líder en el número de instalaciones de gran tamaño (54 unidades), superando al resto del mundo (33 unidades). Dentro de los países europeos, Alemania (15 unidades) y los Países Bajos (10 unidades) destacan por el alto número de instalaciones que poseen. Mientras que Asia cuenta con 14 plantas instaladas. En el caso de los países americanos, Estados Unidos y Canadá cuentan con 18 unidades de recuperación de fósforo en la actualidad.

Cabe señalar que en Alemania existe una ordenanza sobre lodos sanitarios que hace obligatoria la recuperación de fósforo en ellos, la cual indica que para el 2029 todas las PTAS estarán obligadas a recuperar el fósforo si su concentración en el lodo supera los 20 g de fósforo por kg de materia seca de lodos de sanitario (Sichler *et al.*, 2022). Esto obligará a unas 500 de las 9.300 PTAS alemanas, que tratan 2/3 de las aguas servidas del país, a instalar

FUENTE DE RECUPERACIÓN DE FÓSFORO EN LAS AGUAS SERVIDAS

El fósforo está presente en las aguas servidas bajo distintas formas (soluble, coloidal y particular), y son los procesos desarrollados en la línea de tratamiento del agua los que definirán la riqueza en fósforo de los lodos generados. Se puede recuperar desde varios puntos de una planta de tratamiento de aguas servidas, generalmente se trata en el efluente secundario y en las etapas de deshidratación o espesamiento de lodos. Por lo tanto, podrían incluir las fases de corrientes líquidas (aguas servidas) y sólidas (lodos sanitarios), así como las cenizas de lodo sanitarios. La corriente de los lodos sanitarios es la más adecuada para la recuperación debido a la mayor cantidad de fósforo, lo que la hace económicamente viable (Carrillo *et al.*, 2020; Vučić *et al.*, 2021). Se estima que la concentración mínima de fósforo en la corriente líquida de lodos para la viabilidad técnica y económica del proceso es de 70 mg/L (Bien-SUEZ, 2024).

Generalmente, los precipitantes más utilizados son magnesio (Mg^{2+}) o calcio (Ca^{2+}) en forma de sales. En las corrientes líquidas de aguas servidas, que sea en defosfatación simultánea en lodos activados o en defosfatación terciaria, se utiliza mucho el cloruro férrico. El fósforo normalmente se recupera en las corrientes líquidas de los lodos mediante la precipitación de fosfatos de calcio, tales como fosfato cálcico (CaP), hidroxiapatita (HAP), fosfato monocálcico (PMC) y fosfato dicálcico (PDC), o como fosfato de magnesio y amonio (MAP). Este último también conocido como estruvita ($MgNH_4PO_4$). Mientras que la recuperación de fósforo desde las cenizas de lodos sanitarios generalmente se realiza mediante la formación de ácido fosfórico (H_3PO_4) (Egle *et al.*, 2015; Peng *et al.*, 2018).

La Tabla 1 muestra las eficiencias de recuperación de fósforo por productos recuperados y la fuente de recuperación. En términos generales, las eficiencias de recuperación oscilan aproximadamente entre el 10 y el 40% al tratar la corriente líquida de las aguas servidas. En los lodos sanitarios, el bajo rendimiento se debe al exceso de concentración de fósforo en relación a la concentración de DBO_5 , considerando el potencial de formación de lodos asociado.

Este rendimiento puede ser mejorado mediante la incorporación de un tratamiento avanzado del fósforo. Esto se puede lograr a través de procesos biológicos, como incluir una zona anaeróbica al inicio del tratamiento secundario para generar el mecanismo de acumulación biológico de fósforo en el lodo. Alternativamente, se pueden utilizar procesos químicos como la adi-

ción de cloruro férrico en el lodo secundario o en terciario, o mixto (combinación de los anteriores). Sin embargo, un 59% de la PTAS recuperan el fósforo de las corrientes líquidas (aguas servidas, lodos digeridos (fósforo disuelto), sobrenadante del digestor, efluente tratado secundario).

Tabla 1.

Eficiencias de recuperación de fósforo (%) por productos recuperados y fuente de recuperación.

Producto recuperado	Eficiencias de recuperación de fósforo (%)		
	Corrientes líquidas	Lodos sanitarios	Cenizas de lodos sanitarios
Fosfato Monoamónico (MAP) Estruvita ($MgNH_4PO_4$)	10-30	30-95	85-100
Fosfato cálcico (CaP) Fosfato dicálcico (PDC) Fosfato monocálcico (PMC)	10-40	35-99	65-95
Hidroxiapatita (HAP) Ácido fosfórico (H_3PO_4)	75-90	60-95	60-80

Fuentes: Egle *et al.*, (2015); Kabbe, (2017); Shaddel *et al.*, (2019); Nätörp *et al.*, (2019).

Los lodos sanitarios, también conocidos como lodos de depuradora o bio-sólidos, son el subproducto sólido que se genera durante el proceso de tratamiento de aguas servidas. Estos lodos contienen una mezcla de materia orgánica, microorganismos, nutrientes (nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, entre otros) y otros contaminantes como metales pesados y microcontaminantes. En la fase de lodos, aproximadamente el 90% de la carga total de fósforo del afluente se retiene después del tratamiento secundario o avanzado de las PTAS. Las eficiencias de recuperación de fósforo en los lodos aumentan considerablemente, situándose entre el 30 y el 95% dependiendo del tratamiento aplicado. Sin embargo, su tratamiento tiene procedimientos complejos que requieren más recursos y su aceptación social suele ser más cuestionada (Egle *et al.*, 2015; Carrillo *et al.*, 2020).

Las cenizas de lodos sanitarios son un subproducto que se obtiene a partir de los lodos sanitarios, después de someterlos a procesos de incineración (800-900°C). Durante esta etapa, los materiales orgánicos se queman, de-

jando las cenizas, que son residuos inorgánicos. Entre el 97 y el 99,9% del fósforo de los lodos sanitarios se acumula en las cenizas, donde las eficiencias de recuperación son aún más altas, alcanzando valores de entre el 60 y el 100% (Egle *et al.*, 2015). La recuperación a gran escala de cenizas de lodos son un 10% y países como Alemania y Japón se destacan en su implementación (Carrillo *et al.*, 2024).

ESTRUVITA COMO PRODUCTO RECUPERADO

La estruvita es conocida por su capacidad de precipitarse y formar incrustaciones en sistemas de tuberías, tanques de almacenamiento de aguas servidas, y equipos de tratamiento de aguas, lo que puede ocasionar obstrucciones y problemas de mantenimiento en las infraestructuras de las PTAS. Se estima que 100 m³ de aguas servidas pueden producir aproximadamente 1 kg de estruvita (Ghosh *et al.*, 2019).

La estruvita es una sustancia cristalina blanca compuesta por magnesio, nitrógeno y fósforo ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), que precipita bajo condiciones óptimas (pH, concentración molar). Se considera el precipitado más deseable para la recuperación de fósforo debido a su alta pureza (94 a 99%) y su capacidad para eliminar entre el 80 y el 90% de los fosfatos solubles, así como entre el 20 y el 30% del amonio soluble presente en las aguas servidas (Chrispim *et al.*, 2019). Sin embargo, debido a que el magnesio está presente en menores cantidades en las aguas servidas en comparación con el fósforo y el nitrógeno, es necesario añadir un agente precipitador externo adecuado, como lo es el magnesio, para que el proceso sea efectivo (Carrillo *et al.*, 2020).

La estruvita es altamente valorada como fertilizante para el desarrollo de las plantas ya que, debido a su lenta liberación y baja solubilidad en agua (0-6%), minimiza la pérdida de nutrientes cuando se aplica directamente al suelo (Kratz *et al.*, 2019). La velocidad de disolución de la estruvita depende de sus características, tales como tamaño, forma, composición y el pH del suelo (Degryse *et al.*, 2017). En este sentido, esta se favorece en suelos con pH ácido o casi neutro, y su solubilidad disminuye en suelos alcalinos (Cabeza *et al.*, 2011). Por ejemplo, se observó que la velocidad de disolución en suelos ácidos (pH: 5,9-6,1) fue significativamente más rápida, con alrededor del 50% de estruvita disuelta, mientras que en suelos alcalinos (pH: 8,1-8,5) solo se disolvió un 3% (Degryse *et al.*, 2017).

La composición del precipitado de estruvita es muy variable debido a la fuente de aguas servidas (aguas domésticas o industriales), tecnología de recuperación y condiciones óptimas de precipitación (Pérez-Piqueres *et al.*, 2023). El valor teórico de la composición (% en masa) de la estruvita utilizada como fertilizante es de 12,5% de fósforo (P), 5,7% de nitrógeno (N) y 9,9% magnesio (Mg), como muestra la Figura 4.

Existen tecnologías que producen un fertilizante comercial, como Phospho-GREEN™, el que obtiene un precipitado con una composición similar a la de la estruvita teórica (12,5% de P, 5,0% de N y 10% de Mg) (Bien-SUEZ, 2024). Otra tecnología como Crystal Green Pearl de Ostara® indica que obtiene un precipitado con una mayor cantidad de fósforo (28%), junto con el nitrógeno (5%) y magnesio (10% Mg) (Ostara, 2007). Algunas investigaciones de precipitación de estruvita a escala de laboratorio han mostrado que la composición química puede ser muy variada, con rangos de 8,1-21,0% de P, 7,9-17,8% de Mg, 1,7-5,1% de N y 1,2-2,1% Ca (Crutchik y Garrido, 2011; Uysal *et al.*, 2014; Lavanya y Ramesh, 2021; Jokkaew *et al.*, 2022).

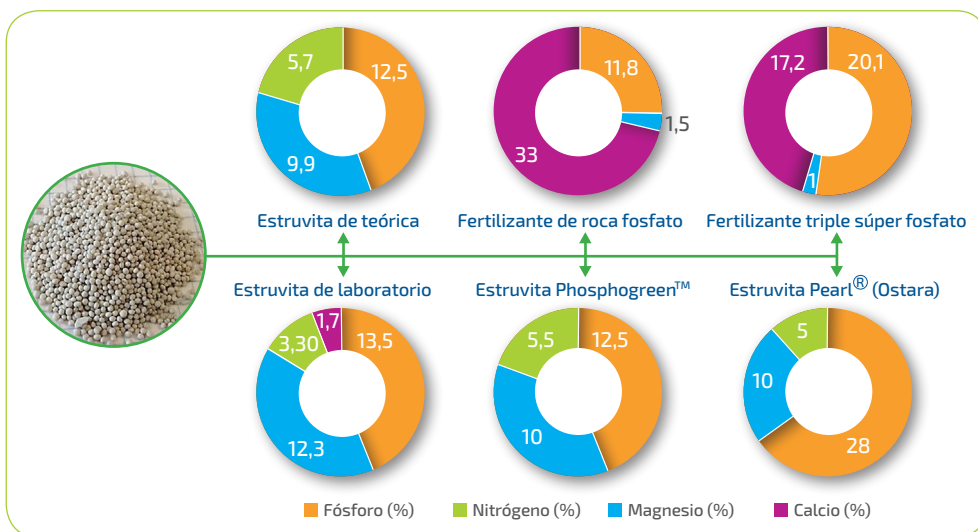


Figura 4.

Análisis de la composición porcentual de elementos tales como fósforo, nitrógeno, magnesio y calcio en diversas formas de estruvita, incluyendo muestras de laboratorio, teóricas, productos comerciales e industriales, y fertilizantes fosfatados convencionales. Fuentes: Ostara, (2007); Cabeza *et al.*, (2011); Crutchik y Garrido, (2011); Uysal *et al.*, (2014); Lavanya y Ramesh, (2021); Jokkaew *et al.*, (2022); SUEZ, (2023).

Existen fertilizantes fosfatados convencionales, como el Triple Super Fosfato (TSP), el cual es un compuesto de fosfato altamente concentrado que contiene alrededor del 20,1% de fósforo disponible soluble en agua, lo que lo convierte en una fuente de fósforo de liberación relativamente rápida. Caso contrario, los fertilizantes de roca fosfato liberan fósforo de manera más gradual a lo largo del tiempo y, requieren ser tratados con ácido sulfúrico antes de su uso para hacerlos solubles para las plantas (Gutiérrez-Moya *et al.*, 2023). Sin embargo, un desafío vinculado a los fertilizantes no convencionales o a la precipitación de estruvita a partir de aguas servidas es el contenido de calcio (Ca), el cual puede provocar la formación de fosfato de calcio insoluble en condiciones de pH neutro o alcalino, resultando en una menor disponibilidad para las plantas a corto plazo (Cabeza *et al.*, 2011; Kratz *et al.*, 2019).

TECNOLOGÍAS Y PRODUCTOS COMERCIALES DE RECUPERACIÓN DE FÓSFORO

Europa es la región líder en cuanto al número de instalaciones a gran escala que producen predominantemente estruvita, representando el 64% del total. Sin embargo, el volumen de estruvita recuperada es actualmente mayor en América del Norte, con un 15%. (Shaddel *et al.*, 2019). La Tabla 2 muestra las tecnologías de recuperación de fósforo a gran escala en la PTAS consideradas partir de la corriente líquidas, lodos sanitarios y cenizas de lodos de sanitarios. Las tecnologías más utilizadas son Pearl (OSTARA®) con 20 PTAS localizadas principalmente en Estados Unidos, NuReSys® con 10 PTAS ubicadas en Países Bajos y Bélgica, y AirPrex® con 8 PTAS encontrándose 5 de estas plantas instaladas en Alemania.

Tabla 2.

Tecnologías de recuperación de fósforo consideradas a partir de las corrientes líquidas, lodos sanitarios y cenizas de lodos de sanitarios.

Fuente de recuperación	Corrientes líquidas	Corrientes líquidas, lodos sanitarios	Lodos sanitarios	Cenizas de lodos sanitarios
Tecnologías	AirPrex® Crystalactor® EloPhos JSA KURITA Kyowa Hakko Pearl® (Ostara) PHORWater STRUVIA™ Treviso WWTP Sydney waterboard	Phostrip ANPHOS Hitachi-Zosen (Unitika)/Phosnix Multiform PHOSPAQ® PhosphoGREEN™ Aqualia	Aqua Reci® EXTRAPHOS Gifhorn LysoGest MEPHREC® NuReSys® Seaborne Stuttgart Swing Canal Isabel II	EcoPhos® METAWATER METAWATER/Lotus Nippon PA RecoPhos® REPHOS® TetraPhos®
Nº PTAS	40	21	19	8

PTAS: Plantas de tratamientos de aguas servidas.

Algunos de los procesos que permiten la recuperación de corrientes líquidas son AirPrex®, Crystalactor®, Pearl®, PhosNix o Unitika, recuperando entre el 10 y el 40% del fósforo disuelto. En lodos sanitarios, las tecnologías de recuperación de fósforo que destacan son Stuttgart, Seaborne, Gifhorn, Aqua Reci®, las que presentan un potencial de recuperación entre 45 y 65%. En relación con la recuperación de fósforo en las cenizas de lodos incinerados, EcoPhos, RecoPhos y TetraPhos recuperan desde un 80 a 90 % del fósforo que ingresa a las PTAS (Chrispim *et al.*, 2019). Phostrip fue una de las primeras tecnologías de recuperación de fósforo a gran escala. La tecnología se basa en la combinación de un tratamiento biológico y químico para precipitar el fósforo en forma de estruvita o fosfato de calcio, lo que permite su recuperación y reutilización como fertilizante (Levin *et al.*, 1987).

Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., fundada el 2005, implementó su primera planta de recuperación de fósforo en la ciudad de Edmonton, Canadá (Ostara, 2007). El proceso de precipitación de estruvita de Ostara®, desarrollado en la Universidad de Columbia Británica, recupera entre el 18 al 22% del fósforo presente en el afluente de la PTAS.

Los productos de fertilizantes a base de estruvita de Ostara se comercializan bajo la marca Crystal Green® y se utilizan en aplicaciones agrícolas y de jardinería. Estos productos son conocidos por su alta calidad y eficacia, así como por su capacidad para liberar nutrientes de manera controlada y sostenible en el suelo, reduciendo al mismo tiempo el riesgo de lixiviación y contaminación del agua. Está aceptado como fertilizante y se utiliza en Estados Unidos, Canadá, Taiwán, Corea del Sur, en el Reino Unido y los Países Bajos, en patata, remolacha, cebolla, césped, jardinería y agricultura en general (Ostara, 2007).

La tecnología Phosphogreen™ desarrollada por la empresa SUEZ ha sido un avance significativo en la recuperación de fósforo a escala industrial. Sus dos primeras unidades en Mulhouse Sausheim y Villiers-Saint-Frédéric en Francia son pioneras en este campo. La capacidad de esta tecnología para recuperar entre el 40 y el 50% del fósforo presente en el afluente de la PTAS es notable, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente de recursos. Además, la expansión de esta solución a través de las tres PTAS en Aarhus, Dinamarca, con instalaciones en Marselisborg, Herning y Aaby, demuestra su efectividad y viabilidad en diferentes contextos (Bien-SUEZ, 2024).

La producción de estruvita en la PTAS de Marselisborg en 2019, que osciló entre 650 y 800 kg al día, destaca el potencial comercial de este subproducto como abono agrícola. En Dinamarca, la estruvita se convierte en un "fertilizante listo para usar" y se comercializa en el mercado bajo el nombre "PhosphorCare", después de obtener la aprobación oficial como fertilizante comercial. Dichas plantas son el resultado de una colaboración entre varios socios públicos y privados. La asociación detrás de la planta de Aaby incluye a Aarhus Vand, Herning Vand, Grundfos, Norconsult y el Servicio Danés de Asesoramiento Agrícola. Mientras que la asociación detrás del proyecto en Marselisborg incluye a Aarhus Vand, SUEZ y Stjernholm (SUEZ, 2023; Bien-SUEZ, 2024).

La tecnología NuReSys® (Nutrients Recovery Systems) fue desarrollada por una empresa belga fundada en 2011, la que se basa en una precipitación controlada de estruvita de los biosólidos. NuReSys cuenta con 10 unidades operativas para el procesamiento de lodos municipales y aguas servidas agroindustriales en Europa entre Bélgica, Países Bajos y Alemania. En un esfuerzo por expandir sus operaciones, NuReSys® está colaborando con la empresa estadounidense Schwing Bioset para implementar la recuperación de fósforo en la PTAS "Tres Ríos" en Arizona, destinada al procesamiento de lodos sanitarios con el objetivo de convertir al menos el 85% del ortofosfato disponible en estruvita (Schwing Bioset, 2021).

El precipitado resultante, denominado BIO-STRU®, está actualmente disponible en el mercado y cuenta con la aprobación de la Comisión Europea. Cumple con los estándares de disponibilidad de permisos, como el fin de la condición de residuo y su clasificación como fertilizante en Bélgica, así como la norma NF U 42-001-1 en Francia. Además, ha recibido la aprobación de NUTRIMAN, la plataforma agrícola web dedicada a los fertilizantes innovadores recuperados de nitrógeno y fósforo (NUTRIMAN, 2020).

La tecnología STRUVIA Phosphorus Recovery and Harvesting, desarrollada por la empresa Veolia con sucursales en gran parte del mundo, facilita la recuperación del fósforo contenido en las aguas servidas. El primer prototipo STRUVIA fue instalado de manera exitosa en la PTAS de Bruselas Norte en Bélgica en el año 2013 y 2014. Esto como parte del proyecto europeo P-Rex. STRUVIA permite una precipitación controlada de la estruvita con un 85% de eficiencia de recuperación de fósforo. Además, el producto presenta un alto valor añadido como fertilizante debido a la lenta disolución de los fosfatos de amonio (Veolia Water Technologies, 2020).

Estruvita: fuente reciclada de fósforo obtenida de aguas residuales

El producto de estruvita, obtenido de las aguas servidas, debe cumplir con criterios de calidad agrícola, ambiental y sanitaria de acuerdo con la legislación sobre fertilizantes para ser utilizado. Esta preocupación por la seguridad y la calidad llevó a la Unión Europea a aprobar una nueva regulación en 2019, que armoniza los estándares de seguridad, calidad y etiquetado de los fertilizantes, limitando los niveles de contaminantes y promoviendo la economía circular (European Council, 2019). La Figura 5 resume los principales productos a gran escala que han dado lugar a la producción comercial de estruvita.



Figura 5.

Empresas especializadas la recuperación de nutrientes en las aguas servidas, los que contienen estruvita como fuente principal de fósforo. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El uso insostenible del fósforo a nivel mundial subraya la urgencia de promover estrategias sostenibles, como la recuperación y reciclaje del fósforo presente en las aguas servidas. Para garantizar el éxito y la sostenibilidad de esta iniciativa en plantas de tratamiento a gran escala, es fundamental considerar una amplia gama de factores. Esto incluye aspectos técnicos, económicos, regulatorios, sociales, ambientales y de salud pública.

La coordinación efectiva entre todas las partes interesadas es fundamental, con el fin de asegurar que se aborden adecuadamente las implicaciones para la salud de la población y que todos los involucrados se beneficien de esta iniciativa. Es crucial considerar las regulaciones y normativas locales e internacionales, así como la colaboración con autoridades reguladoras, empresas privadas, agricultores y la comunidad en general. Además, el avance observado en países más desarrollados indica que la recuperación de fósforo puede ser una solución sostenible y viable para el futuro, lo que resalta la importancia de seguir avanzando en la investigación, el desarrollo tecnológico y la implementación de prácticas ambientalmente responsables a nivel global.

REFERENCIAS

- Aleksandra Bien- SUEZ. 2024. Phosphogreen™ in Marselisborg wastewater treatment plant in Denmark. Disponible en: <https://www.suez.com/-/media/suez-global/files/dk/brochures/brochure-phosphogreen-marselisborg-case-english.pdf?open=true>
- Cabeza, R., Steingrobe, B., Römer, W., & Claassen, N. 2011. Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 91, 173-184.
- 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 & Biotechnology*, 19(2).
- 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.
- 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.
- Crutchik, D. G. J. M., & Garrido, J. M. 2011. Struvite crystallization versus amorphous magnesium and calcium phosphate precipitation during the treatment of a saline industrial wastewater. *Water Science and Technology*, 64(12), 2460-2467.
- Degryse, F., Baird, R., Da Silva, R. C., & McLaughlin, M. J. 2017. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers—effect of soil pH, granulation and base excess. *Plant and Soil*, 410, 139-152.
- 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.
- Egle, L., Rechberger, H., & Zessner, M. 2015. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 325-346.

- 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° 1069/2009 y (CE) N° 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) N° 2003/2003. Brussels, Belgium.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2022. World fertilizer trends and outlook to 2022. Rome.
- Ghosh, S., Lobanov, S., & Lo, V. K. 2019. An overview of technologies to recover phosphorus as struvite from wastewater: advantages and shortcomings. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 19063-19077.
- Gutiérrez-Moya, E., Lozano, S., & Adenso-Díaz, B. 2023. A pre-pandemic analysis of the global fertilizer trade network. *Resources Policy*, 85, 103859.
- International Fertilizer Association (IFA). (2020). Outlook 2020–2024 Market Intelligence and Agriculture Services. Outlook.
- Jasinski, S.M. 2024. Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, January 2024. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-phosphate.pdf>
- Jokkaew, S.; Jantharadej, K.; Pokhum, C.; Chawengkijwanich, C.; Suwannasilp, B.B. 2022 Free and Encapsulated Phosphate-Solubilizing Bacteria for the Enhanced Dissolution of Swine Wastewater-Derived Struvite—An Attractive Approach for Green Phosphorus Fertilizer. *Sustainability*, 14, 12627.
- 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
- 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.
- Kratz, S., Vogel, C., & Adam, C. 2019. Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115, 1-39.

- Lavanya, A., & Ramesh, S. K. T. 2021. Crystal seed-enhanced ammonia nitrogen and phosphate recovery from landfill leachate using struvite precipitation technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 60569-60584.
- Levin, G. V., & Della Sala, U. 1987. Phostrip® Process—a Viable Answer To Eutrophication of Lakes and Coastal Sea Waters in Italy. In Biological phosphate removal from wastewaters *Pergamon* (pp. 249-259).
- Nättorp, A., Kabbe, C., Matsubae, K., Ohtake, H. 2019. Development of phosphorus recycling in Europe and Japan. *Phosphorus recovery and recycling*, 3-27.
- NUTRIMAN. 2020. Nutrient Management and Nutrient Recovery Thematic Network, Struvite from digested sludge and wastewater by “nuresys” process. Disponible en: https://nutrیمان.net/farmer-platform/product/id_293
- Ostara, 2007. Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.: Edmonton Reveals World's First Industrial Scale Sewage Treatment Facility to Recycle Nutrients Into Environmentally-Safe Commercial Fertilizer. Disponible en: <https://www.ostara.com/wp-content/uploads/2007/12/ostara-news-2007-12-03.pdf>
- Peng, L., Dai, H., Wu, Y., Peng, Y., & Lu, X. 2018. A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. *Chemosphere*, 197, 768-781.
- Pérez-Piqueres, A., Ribó, M., Rodríguez-Carretero, I., Quiñones, A., & Canet, R. 2023. Struvite as a Sustainable Fertilizer in Mediterranean Soils. *Agronomy*, 13(5), 1391.
- Schwing Bioiset. 2021. Actualizaciones del sistema de biosólidos WRF del condado de Pima, AZ, Tres Ríos - Cuarta parte: Sistema de recuperación de nutrientes NuReSys. Disponible en: <https://www.schwing-bioiset.com/pima-county-az-tres-rios-wrf-biosolids-system-upgrades-part-four-nuresys-nutrient-recovery-system-2/>
- 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.

- Sichler, T. C., Montag, D., Barjenbruch, M., Mauch, T., Sommerfeld, T., Ehm, J. H., & Adam, C. 2022. Variation of the element composition of municipal sewage sludges in the context of new regulations on phosphorus recovery in Germany. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 84.
- Smith, V.H., Joye, S.B. and Howarth, R.W. 2006. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography* 51, 351-355.
- 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.
- SUEZ. (2023). INNOVATION FOR CIRCULAR WATER AND WASTE SOLUTIONS. In: Phosphogreen™, producing fertilisers from our wastewater. Disponible en: https://www.suezwaterhandbook.com/content/download/5322/86220/version/16/file/Phosphogreen_P-ER-019-EN-1606_V5.pdf
- Uysal, A., Demir, S., Sayilgan, E., Eraslan, F., & Kucukyumuk, Z. 2014. Optimization of struvite fertilizer formation from baker's yeast wastewater: growth and nutrition of maize and tomato plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 3264-3274.
- Veolia Water Technologies. 2020. STRUVIA™ Recuperación sostenible de fósforo de las aguas residuales. Disponible en: https://www.veoliawatertechnologies.es/sites/g/files/dvc2991/files/document/2020/11/49348-160266_Brochure_STRUVIA_SP_v4.pdf
- Vučić, V., Süring, C., Harms, H., Müller, S., & Guenther, S. 2021. A framework for P-cycle assessment in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 760, 143392.



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HIDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERIA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

ESTRUVITA: FUENTE RECICLADA DE FÓSFORO OBTENIDA DE AGUAS RESIDUALES



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM