



EL AGUA RESIDUAL COMO RECURSO DE NUTRIENTES

WASTE WATER, A RESOURCE OF NUTRIENTS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

ELIDA LUCIANA RIVADÁVIA HUAMANÍ

Dirigido por:

Dr. ELOY GARCÍA CALVO

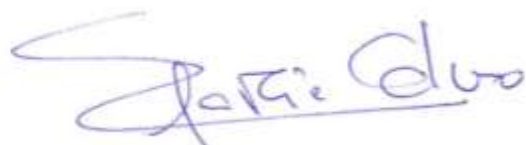
Alcalá de Henares, a 07 de septiembre de 2019

D./D^a Eloy Garcia Calvo

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: El agua residual como recurso de nutrientes, ha sido realizado

bajo mi dirección por el alumno/a D./D^a Alcalá de Henares, a 07 de septiembre de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Eloy Garcia Calvo". The signature is stylized with a large initial 'E' and a long horizontal stroke at the end.

AGRADECIMIENTOS

A Divino Dios, Creador y Hacedor, por su amor y misericordia, me guio durante el proceso de este estudio.

A Dr. Eloy García Calvo, por la Universidad Alcalá de Henares (UAH), por su orientación, dirección y apoyo extraordinario.

ÍNDICE

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVO	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	15
4. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES	17
4.3 Fósforo	22
4.3.1 De efluentes líquidos provenientes de tratamientos de aguas residuales.	22
4.3.2 De lodos de depuradora - tecnología química húmeda	24
4.3.3 De lodos de depuradora - tecnologías termoquímicas.	28
4.3.4 Ejemplos y aplicaciones de recuperación de nutrientes (N-F).	31
4.4 Recuperación de nitrógeno en investigación	35
4.5 Recuperación de fósforo en investigación.....	38
5. CONCLUSIONES	40
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características químicas de nutrientes contenidos en aguas residuales domesticas crudas.	16
Tabla 2. Contenido típico de nutrientes en aguas residuales domesticas	16
Tabla 3. La composición química típica de los lodos producidos y tratados (Metcalf y Eddy, 2003).	17
Tabla 4. Concentración de nitrógeno y masa relativa de nitrógeno en cuatro flujos específicos (obtenido de Ven der Hoek <i>et al.</i> , 2018).....	21
Tabla 5. Producción de lodos de depuradora e instalaciones de mono-incineración en países seleccionados (ASH DEC 2009).	30
Tabla 6. Marco de gestión de aguas residuales desde una perspectiva de recursos (Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017).....	32
Tabla 7. Consumo de nutrientes por diversos cultivos.	34
Tabla 8. Valores típicos para los principales nutrientes en la orina. Basado en números en texto y Ciba Geigy (1977 citado por Maurer <i>et al.</i> , 2003) con concentraciones características en orina de adultos	36
Tabla 9. Ejemplos de revisiones anteriores sobre la recuperación de nutrientes encontrados en excreta humana y corrientes que contienen excreta humana.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. La producción mundial de fósforo (Adam 2009, citado por Nieminen, 2010)..	11
Figura 2. Las reservas mundiales de fósforo – limitadas - U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, enero 2018.....	12
Figura 3. Las aguas residuales en el ciclo del agua – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017.	19
Figura 4. Flujos de aguas residuales – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017. ...	23
Figura 5. Recuperación de fósforo de la fase líquida durante el tratamiento de aguas residuales (Cornel y Schaum, 2009 citado por Cornel y Meda, 2011).....	24
Figura 6. Balance de fósforo para una planta de tratamiento de aguas residuales municipales típica en Alemania con eliminación biológica de fósforo y/o precipitación. PS, lodos primarios; SS, lodos secundarios excedentes; EBPR, eliminación mejorada de fósforo biológico. (Schaum, 2007).	25
Figura 7. Liberación de aluminio, calcio y fósforo en mezclas de sustancias puras (fosfato de aluminio, carbonato de calcio, dióxido de silicio), después del tratamiento térmico a 500, 700 y 900 °C; mezcla A: $P_{tot}/Catot \approx 1 \frac{1}{2}$ [mol/mol]; mezcla B: $P_{tot}/Catot \approx \frac{3}{4}$ [mol/mol] (Schaum, 2007).	26
Figura 8. Principio del proceso químico húmedo (Cornel y Schaum, 2009).	27
Figura 9. Componentes disueltos en lodo con respecto al valor de pH (Bayerle 2009 citado por Nieminen, 2010).	27
Figura 10. Principio del proceso termoquímico (Hermann 2009b citado por Nieminen, 2010).	29
Figura 11. Reutilización de agua luego del tratamiento avanzado (terciario) a nivel mundial: Cuota de mercado por finalidad de uso – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017.	32
Figura 12. Solubilidad de estruvita vs pH (Koch <i>et al.</i> 2009 citado en Nieminen, 2010). 34	

TABLA DE ABREVIATURAS

ASH DEC	Proceso de recuperación de fósforo.
BES	Sistemas bio-electroquímicos
EDAR	Estación Depuradora de Aguas.
ENB	Eliminación de nutrientes biológicos.
EBPR	Eliminación mejorada de fósforo biológico.
N	Nitrógeno
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
P	Fósforo
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales.
t/a	Toneladas por año.
TN	Nitrógeno total.
TP	Fósforo total.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, La Ciencia y La Cultura.
VS	Versus.

RESUMEN

Hoy en día, el agua residual de origen doméstica es considerada deshechos con poco uso beneficioso, por desconocimiento de los recursos que lleva consigo, que son susceptibles de recuperarse, como el nitrógeno y fósforo, que son nutrientes fundamentales en la agricultura, los límites de descarga de nitrógeno son cada vez más exigentes, las reservas de fósforo en el mundo empiezan a ser motivo de preocupación, el requerimiento de energía es muy alta para recuperar nutrientes además de consumir mucha energía necesita grandes cantidades de producto químico, por lo que la recuperación de estos dos nutrientes del agua residual aliviaría la presión sobre la naturaleza de las aguas vertidas a la vez que se recuperan recursos esenciales.

El objetivo de este trabajo es examinar la recuperación de nitrógeno y fósforo de aguas residuales con los diferentes métodos, para lo cual se realizó una revisión bibliográfica de la recuperación de nutrientes de aguas residuales en línea de líquido depurado, lodos depurados y de ceniza de lodos depurados que se vienen implantando y aplicando en la actualidad, así como nuevas formas de recuperación que se vienen desarrollando a nivel de investigación y laboratorio. Diversas tecnologías que recuperan nutrientes como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domesticas o municipales, como las tecnologías químicas húmedas y termoquímicas de lodos de depuradoras, también de reutilización directa de nutrientes provenientes de la línea de líquidos tratados. Las concentraciones de nutrientes varían entre 10 y 100 mg/l de nitrógeno, 5 y 25 mg/l de fósforo.

De lo desarrollado por diversos autores se establecen que las cantidades de nutrientes recuperados son diferentes por tipos de tecnología y método de recuperación para el caso de nitrógeno después de un tratamiento secundario varía entre 10 y 60 mg/l, la contribución de las heces se basa en 1,4 g N/persona/día de los cuales se puede recuperar en 15% de nitrógeno en línea de líquidos, en caso de lodos tratados los nitrógenos se pueden recuperar con las tecnologías: filtración por membrana al vacío y por membrana hidrofóbica de 75% en ambos casos. Con respecto al fosforo, las corrientes laterales ricas en fósforo con concentraciones de fósforo 450 mg/l y en condiciones normales con tratamiento secundario oscila entre 6 y 15 mg/l de fósforo, una concentración de influente promedio de 11.5 mg/l de fósforo que son originados de excretas humanas, mediante la tecnología EBPR se podría recuperar un 50% de fósforo de lodos de depuradora.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el agua residual de origen doméstica es considerada deshecho con poco uso beneficioso, por desconocimiento de los recursos que lleva consigo, que son susceptibles de convertirse en dinero al recuperarse, los subproductos de las aguas residuales como el nitrógeno y fósforo, tienen valor económico potencial que puede utilizarse, toda vez que son nutrientes fundamentales en la agricultura, aunque varios países ya van valorando como una fuente potencialmente sostenible de recursos.

Por otro lado, debido al aumento de la producción de alimentos, aumentará la demanda de nitrógeno y fósforo ya que las áreas de cultivos se expanden y demandan mayor cantidad de fertilizantes al ritmo de la densificación de ciudades. Por lo que los nutrientes principalmente el nitrógeno y fósforo como fertilizantes en cultivos juegan un papel crítico en el abastecimiento de necesidad de alimentos (Van der Hoek *et al.*, 2018).

En relación al fósforo, este tiene un ciclo geológico inorgánico y dos ciclos orgánicos que ocurren en la tierra y en el agua. Las mayores reservas de roca de fosfato se encuentran en Estados Unidos, el consumo en exceso lleva a la necesidad de importar (Nieminen. 2010). Además, la recuperación de fósforo probablemente se vuelva incluso más competitiva en función de los costos con el alza del costo de extracción del fosfato mineral, que es limitado y no renovable (Wichelns *et al.*, 2015).

Asimismo, el mayor contenido de fósforo en roca en Europa del Este ocurre en Finlandia: la mina Siilinjärvi produce apatito 850 000 t/a con una concentración de fósforo tan alta como 36% P_2O_5 (Ylinen, 2009).

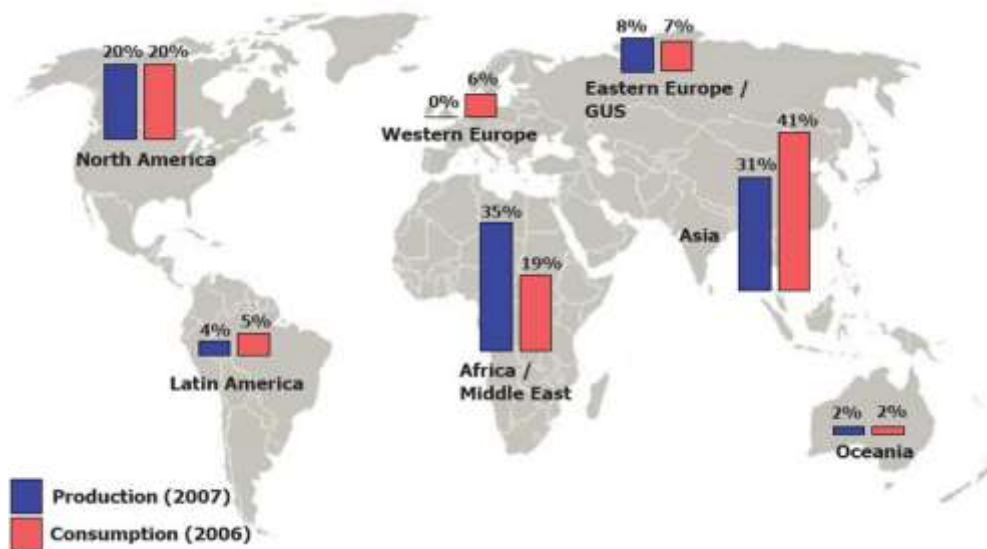


Figura 1. La producción mundial de fósforo (Adam 2009, citado por Nieminen, 2010).

En caso de Latinoamérica en 2006 por ejemplo se tuvo un consumo de 5%, mayor a la producción del 4% en 2007. En 2008, el precio de la roca de fosfato aumentó rápidamente en todo el mundo (Figura 1), debido al aumento de la demanda agrícola. (Nieminen, 2010). El precio en los Estados Unidos se duplicó, y el precio promedio en las áreas de exportación, en el África del Norte, se acercó a los 400 €/t, que es cinco veces mayor que el precio promedio en 2007 (U.S. Geological Survey 2009). el aumento de los costos en la producción de fertilizantes puede incrementarse en cualquier momento, y la extinción de roca de fosfato de buena calidad dará lugar a incertidumbre en los mercados.

De similar manera, los países de la Unión Europea (UE), con una población total de 456 millones de personas, consumen alrededor de 110 000 t de fósforo como detergentes. A modo de comparación, el uso de fosfatos en fertilizantes es equivalente aproximadamente a 1,25 millones de t/a de fósforo (Comisión de la UE 2007 citado por Nieminen, 2010), es por ello a medida que pasen los años las materias primas como es la roca mineral de fósforo se ira agotando, la recuperación de una fuente del nutriente de P se hace imprescindible.

Las mayores reservas de roca de fosfato se encuentran en Estados Unidos, China y Morocco, Argelia y Brazil. La recuperación de estos nutrientes, sin embargo, es costosa (U.S. Geological Survey, 2010, citado por Nieminen 2010). Las reservas mundiales de fósforo están limitadas a unos pocos países.

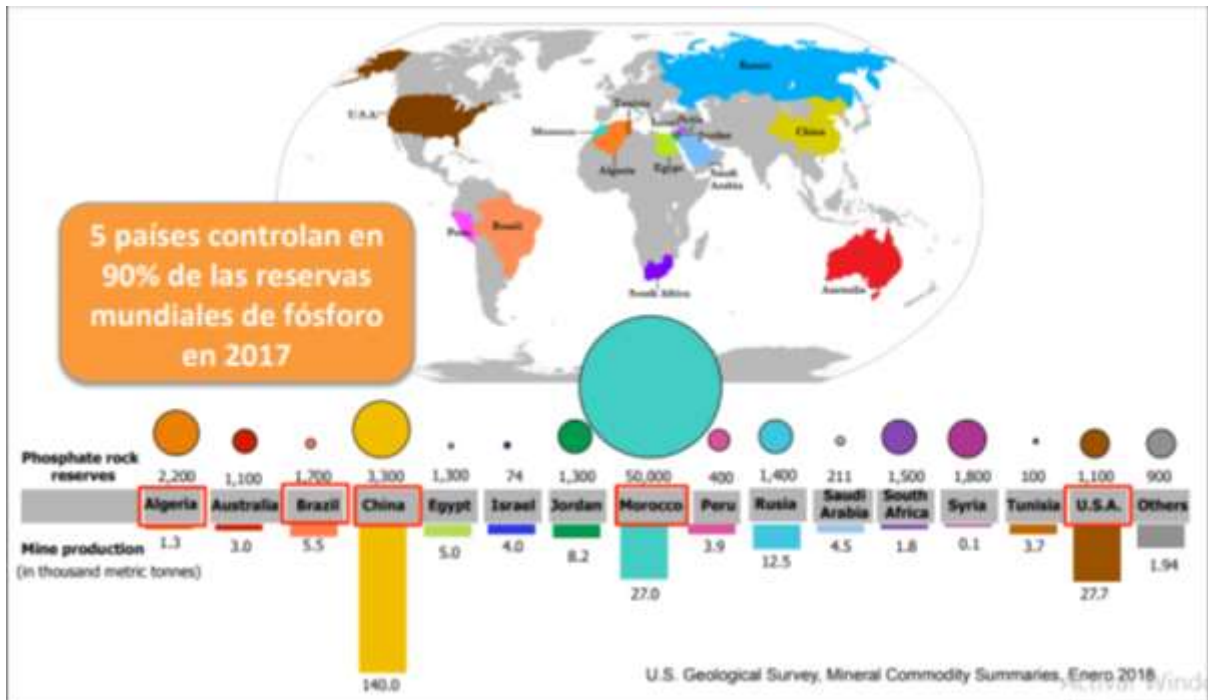


Figura 2. Las reservas mundiales de fósforo – limitadas - U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, enero 2018.

En consecuencia, se cree que en los próximos 50 a 100 años los recursos minerales extraíbles de fósforo serán escasos o se habrán agotado (Steen, 1998; Van Vuuren *et al.*, 2010).

Asimismo, afirma Ashley *et al.*, (2011). El fósforo es un elemento inusual. No se encuentra en la naturaleza como un elemento libre debido a su alta reactividad. Bioquímicamente, el fósforo es la base de toda la vida en nuestro planeta. Los humanos adultos contienen aproximadamente 0.7 kg de fósforo, principalmente en huesos y dientes como sales de fosfato de calcio. El destino de la humanidad en este planeta puede, de hecho, descansar en este factor de reconocimiento

Por otro lado, el destacado químico y escritor científico Isaac Asimov declaró sucintamente: "La vida puede multiplicarse hasta que se haya agotado todo el fósforo y luego haya un alto inexorable que nada puede evitar" (1974 citado por Ashley *et al.*, 2011).

En relación al nitrógeno, la orina humana consiste en más del 90% de agua (H₂O) en peso, el resto son sales inorgánicas y compuestos orgánicos (Rose et al., 2015). Los sólidos secos contienen alrededor de 13% de carbono (C), **14-18% de nitrógeno (N)**, 3.7% de fósforo (P) y 3.7% de potasio (K) (Rose et al., 2015 citado por Harder *et al.*, 2019) aproximadamente el **85% del nitrógeno (N)** se fija en la urea, las heces humanas consisten en aproximadamente un 75% de H₂O en peso y un 25% de material sólido, principalmente materia orgánica N, P y K representan 5 a 7%, 3 a 5,4% y 1 a 2,5% de los sólidos secos respectivamente. En general, la **orina contiene la mayoría de N** y aproximadamente la mitad de P y K, mientras que las heces son ricas en P (Heinonen-Tanski y Van Wijk-Sijbesma, 2005 citado por Harder *et al.*, 2019).

De estas evidencias, si actualmente somos 7 000 millones de personas es porque a finales del siglo XIX los químicos Haber y Bosch descubrieron el proceso industrial que permitía obtener amoníaco a partir del nitrógeno atmosférico. La importancia que tiene este proceso es tal que se calcula que el 8,27% del total del consumo de energía mundial se utiliza en esta reacción química y el 75% de los átomos de nitrógeno de su cuerpo han pasado por este proceso. Por lo tanto, dijera lo que dijera Lavoisier, el nitrógeno es vida (Mulet, 2018 publicado en diario El Paiz Semanal).

Si bien es cierto, los límites de descarga son cada vez más exigentes en nitrógeno junto con la preocupación por recuperar nutrientes para producir fertilizantes valiosos, pero hoy en día se considera una forma costosa de producir nitrógeno para fertilizantes, el nitrógeno se convierte principalmente en gas N₂ y se pierde en la atmósfera (ONU, 2017), **El requerimiento de energía es alto** para recuperar nutrientes, consumen mucha energía y necesitan grandes cantidades de productos químicos, Por lo tanto, el desafío es encontrar no solo una solución efectiva sino también económica y sostenible (Sancho, 2017).

Aunando a la situación, el cuerpo humano contiene aproximadamente 3% en peso de nitrógeno, el cuarto elemento más abundante en el cuerpo después del oxígeno, carbono, e hidrógeno. Conjuntamente fuera de sus usos principales como fertilizantes y reservas de energía, compuestos nitrogenados orgánicos son versátiles. Por estas razones y más, es relevante examinar vías más sostenibles para el nitrógeno, que consisten en intervenciones en el presente ciclo de nitrógeno (antropogénico), como la recuperación directa de nitrógeno de las aguas residuales y su reutilización en los cultivos (Van der Hoek *et al.*, 2018).

En consecuencia, examinar la recuperación de los nutrientes de las aguas residuales domésticas, como el fósforo y nitrógeno son cruciales para la producción moderna y eficiente de cultivos y no tomarla en cuenta puede resultar en grandes fracasos (Nieminen, 2010).

Por lo tanto, la recuperación de fósforo de las aguas residuales se ha convertido en una opción cada vez más necesaria, se estima que un 22% de la demanda mundial de fósforo puede satisfacerse con el reciclaje de las heces y orina humanas en todo el mundo (Mihelcic *et al.*, 2011 citado por ONU, 2017).

Con esa finalidad, es probable que la recolección y utilización de orina sea un elemento de la gestión ecológica de aguas residuales cada vez más importante, ya que esta contiene **el 88% de nitrógeno y el 66% del fósforo** que se encuentran en los desechos humanos, **ambos componentes esenciales** para el crecimiento de las plantas. Como se prevé que en las próximas décadas los recursos minerales de fósforo sean escasos o, incluso, se agoten en cantidad y calidad (Maurer *et al.*, 2003), una alternativa realista y viable sería la posibilidad de recuperarlo en las aguas residuales (ONU, 2017).

Sobre la base de las ideas expuestas, a lo largo de los años se ha visto el no crecimiento desarrollado de los cultivos, pastos, plantas o alfalfas por falta de fertilizantes como del fosforo y nitrógeno, sin garantizar que la humanidad pueda continuar alimentándose en el futuro, con la posible fuente de abastecimiento de agua y nutrientes que podría reducir considerablemente las presiones sobre el medio ambiente (ONU, 2017) Además, con esta práctica se estaría proporcionado salud a la presión del agua, vertimiento, ecosistemas y ambiente, mientras protege la salud ambiental y humana.

Otra tarea prioritaria, en los últimos días se están presentando conflicto social por la disposición final de los lodos de PTAR, los dueños de los terrenos cercanos se oponen, además, se hace un sitio de disposición final de una parte de lodos. por eso se hace importantísimo la recuperación de las aguas residuales/lodos como recurso de nutrientes que aliviaría o solucionaría diversos costas, gastos y problemas sociales.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo General

- ♦ Examinar la recuperación de nitrógeno y fósforo de aguas residuales con los diferentes métodos. Implantados y en estudio.

2.2 Objetivos Específicos

- ♦ Describir la generación, características, y concentración de los nutrientes en aguas residuales domésticas.
- ♦ Estudiar las tendencias de usos seguro del agua residual como recurso de nutrientes

3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales crudas es decir que no han sido sometidas a ningún tipo de tratamiento se componen, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos suspendidos o coloidales (ONU, 2017), estos sólidos están compuestos generalmente de sólidos en suspensión, materia orgánica biodegradable, patógenos, contaminantes prioritarios, materia orgánica refractaria, metales pesados, sólidos inorgánicos disueltos y **nutrientes** (Metcalf et al., 1995).

Ahora, en las aguas residuales municipales, la orina es la fuente dominante de los principales nutrientes agrícolas, **nitrógeno**, **fósforo** y potasio, y contiene del 50% al 90% de estos elementos esenciales (Larsen y Gujer, 1996). Por lo tanto, la orina es un objetivo principal para lograr un manejo más sostenible de los nutrientes de las aguas residuales urbanas. Del consumo de fertilizantes en la UE, el **12% de N**, el **6% de P** y el 10% de K podrían recuperarse de la orina al máximo (Maurer *et al.*, 2003).

Igualmente, estos nutrientes contenidos en las aguas residuales de origen doméstico, comprenden generalmente nitrógeno y fosforo, compuestos que están presentes en estas aguas en la forma que se describe en el cuadro siguiente:

Tabla 1. Principales características químicas de nutrientes contenidos en aguas residuales domesticas crudas.

Parámetros	Descripción
NITRÓGENO TOTAL	Nitrógeno total incluye nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato. Nitrógeno orgánico y amonio en conjunto son llamados Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN).
Nitrógeno Orgánico	Nitrógeno en forma de proteínas, aminoácidos y urea
Amonio	Producido en la primera etapa de la descomposición de nitrógeno orgánico.
Nitrito	Etapas intermedia en la oxidación de amonio. Prácticamente ausente en agua residual cruda.
Nitrato	Producto final en la oxidación del amonio. Prácticamente ausente en agua residual cruda.
FOSFORO TOTAL	Fosforo total existen en forma orgánica e inorgánica.
Fosforo orgánico	Combinado con materia orgánica.
Fosforo inorgánico	Ortofosfatos y polifosfatos.

En efecto, el contenido de estos nutrientes presentes en las aguas residuales domesticas con baja incidencia de aguas residuales industriales, usualmente presenta las concentraciones siguientes según el tipo de agua residual.

Tabla 2. Contenido típico de nutrientes en aguas residuales domesticas

Materia	Unidad	Tipo de agua residual cruda			
		Concentrado	Moderado	Diluido	Muy diluido
Nitrógeno Total	g N/m ³	80	50	30	20
Fosforo Total	g F/m ³	23	16	10	6

g/m³=mg/l=ppm

Por otro lado, las características de los lodos dependen principalmente de su origen, su tiempo de retención en las etapas de la PTAR y el tipo de tratamiento que han recibido, a lo largo de los procesos de tratamiento a la que es sometida en una planta depuradora, generara que los compuestos presentes varíen en su composición y concentración.

Tabla 3. La composición química típica de los lodos producidos y tratados (Metcalf y Eddy, 2003).

Concepto	Unidades	Lodos primarios	Lodos primarios digeridos	Lodos secundarios
Nitrógeno (N)	% de ST ¹	1.5-4	1.6-3	2.4-5
Fósforo (P ₂ O ₅)	% de ST	0.8-2.8	1.5-4	2.8-11

¹ST = Sólidos totales.

Las concentraciones de nutrientes varían entre 10 y 100 mg/l de nitrógeno, 5 y 25 mg/l de fósforo (Mara y Carnicross, 1990 citado por Silva *et al.*, 2008). No obstante, queda claro que el suministro de nutrientes por las aguas regeneradas no es suficiente para abastecer las necesidades nutricionales de determinados cultivos, produciendo en muchos casos una disminución de rendimientos y siendo necesario la aplicación de fertilizantes minerales para obtener unos rendimientos esperados (Dias *et al.*, 2012). Esto nos lleva a buscar alternativas de densificar la recuperación de estos potenciales recursos, como la existencia de sistemas con separación de efluentes con alto contenido en orina, puesto que este producto de excreción humana contiene la mayor parte de los nutrientes que se pueden encontrar en las aguas residuales domésticas. Se pueden utilizar incluso directamente sobre los cultivos (Letón, 2015).

4. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES

La composición de las aguas residuales crudas y depuradas/regeneradas, se componen de nutrientes, que podrían ser una fuente de suministro de nutrientes, en relación al nitrógeno, en su discurso de apertura en la Conferencia de Recuperación de Nutrientes de mayo de 2009 el Dr. James Barnard declaró que "el nitrógeno se puede recuperar de las aguas residuales, pero el costo de la recuperación es muy superior al de la fijación de nitrógeno de la atmósfera" (Barnard, 2009 citado en Comel *et al.*, 2011).

Por otro lado, controlar y regular los diversos flujos de aguas residuales es el fin último de la gestión de aguas residuales, y una de las facetas es: La recuperación de subproductos útiles. Se pueden extraer varios componentes de las aguas residuales, ya sea directamente

(por ejemplo, nutrientes), existe un número creciente de oportunidades potencialmente rentables para extraer materiales útiles de las aguas residuales, como nitrógeno y fósforo, que pueden transformarse en fertilizantes (ONU, 2017).

Ahora para recuperar nitrógeno y fósforo de las aguas residuales o lodos cloacales se necesitan tecnologías de última generación, que, si bien siguen en la etapa de desarrollo, han avanzado mucho en los últimos años. Son cada vez más los casos donde (por ejemplo, Bangladesh, Ghana, India, Sudáfrica, Sri Lanka, etc.) las municipalidades participan en la deshidratación de los lodos cloacales, cocompostaje y granulación seguros (Nikiema *et al.*, 2014 citado en ONU, 2017).

De tal manera, para mayor generación se ha observado una creciente tendencia a contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, que atienden establecimientos individuales o pequeños grupos de establecimientos. Permiten la recuperación de nutrientes y el ahorro de agua dulce y garantizan el acceso al agua en tiempos de escasez. Se estima que estos tienen un costo de instalación que representa entre un 20 y 50% el valor de las plantas de tratamiento convencionales, y los costos operativos y de mantenimiento son aún más bajos entre un 5 a 25% del valor de las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales (ONU, 2017).

Es por ello se hace necesaria la recuperación de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) puede agregar nuevas fuentes de ingreso importantes que permitirían mejorar en materia de recuperación de costos (ONU, 2017). Asimismo, nos indica, no obstante, el costo será menor si comparamos el costo de represamiento, cosecha o desalinización de agua para regar los cultivos.

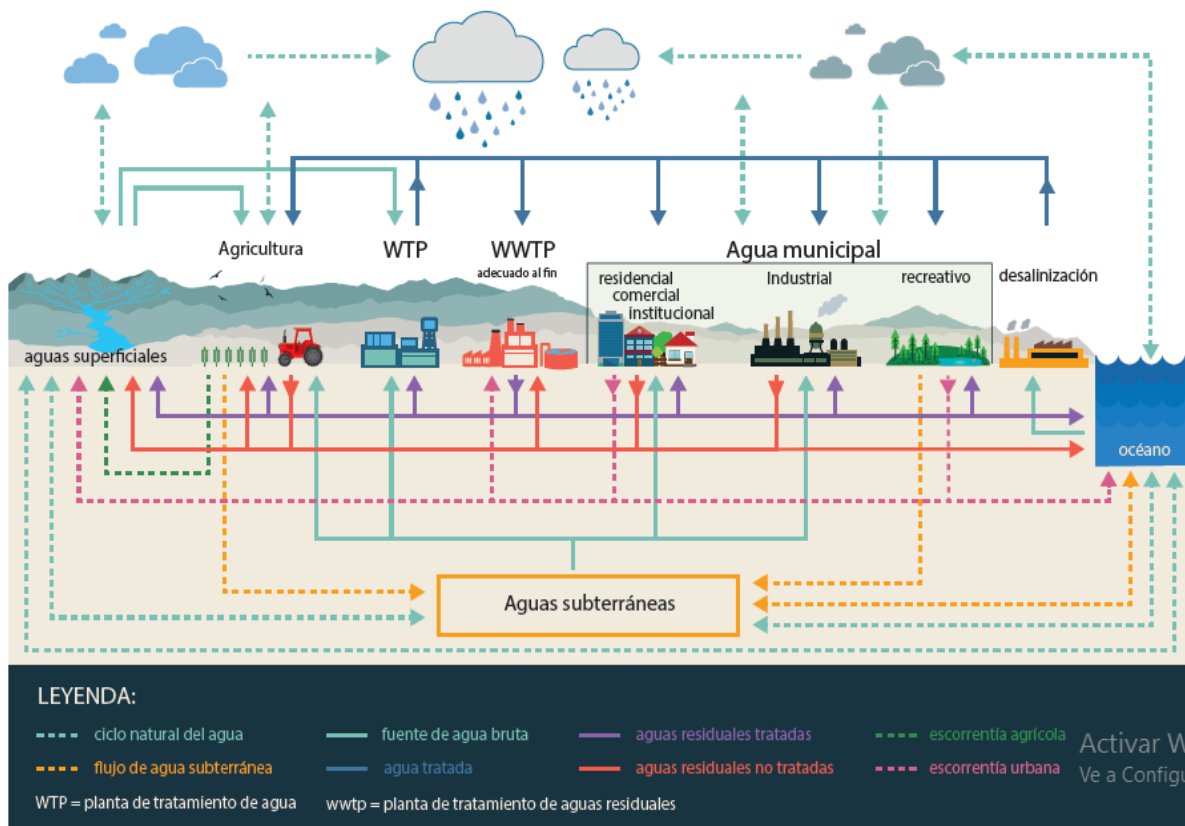


Figura 3. Las aguas residuales en el ciclo del agua – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017.

Si se tratan adecuadamente y se utilizan en forma segura, las aguas residuales domésticas constituyen una valiosa fuente tanto de agua como de nutrientes (ONU, 2017).

4.1 Nitrógeno de efluentes líquidos provenientes de tratamientos de aguas residuales.

El nitrógeno es un componente de las aguas residuales urbanas se pueden usar en sus varias formas de: riego por goteo, por aspersión y riego tecnificado, para tener resultados robustos será necesario el uso planificado de aguas residuales tratadas depuradas y/o regeneradas. La cantidad total de nitrógeno después de un tratamiento secundario varía entre 10 y 60 mg/l, esta variación depende del tipo y grado de tratamiento dado. Es importante ya que si se somete tratamientos secundarios biológicos de fangos activados se obtendrá nitrógenos en forma amoniacal orgánico, mientras que si se someten a tratamientos de aireación prolongada se obtendrán nitratos que son rápidamente absorbibles por las plantas (Días *et al.*, 2012).

En el informe anual señala que se puede recuperar un 15% del nitrógeno presente en las aguas residuales urbanas (Drechsel *et al.*, 2015^a citado por ONU, 2017). Así la recuperación del nitrógeno permitirá el desarrollo de ecosistemas acuáticos gracias a la reducción de la contaminación del agua y la recarga de acuíferos agotados (ONU, 2017).

Con respecto, el uso de aguas residuales tratadas de forma segura es ahora una herramienta que se utiliza para aumentar la disponibilidad de agua, en muchos Estados árabes, en 2013, se usó el 71% de las aguas residuales tratadas que contienen nutrientes de nitrógeno y fósforo, recolectadas en los Estados árabes en forma segura y de este porcentaje un 21% se utiliza, en su mayoría, para actividades de riego (ONU, 2017).

4.2 Nitrógeno de lodos provenientes de tratamientos de aguas residuales.

Los lodos de aguas residuales tratadas depuradas sean estas domesticas o urbanas poseen subproductos cruciales, este lodo generado es rico en nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere un potencial considerable como acondicionador del suelo y fertilizante (ONU, 2017).

Por otra parte, se tiene un estudio realizado que señala al balance de nitrógeno de la PTAR Amsterdam-West que en el primer paso fue un enfoque basado en la concentración de nitrógeno medida en el afluente y el efluente. **El nitrógeno en el lodo excedente se determinó en la planta (75g N/kg ds).** Para el lodo primario, el lodo digerido y el lodo externo, se asumió el mismo valor. Debido a los flujos de bajo volumen, el impacto de esta suposición es muy limitado. El contenido de nitrógeno en el agua de rechazo del digestor se determinó a 1030 mg/l, pero mostró grandes variaciones (750 -1700 mg N/l). El saldo se cerró por el supuesto de que todas las demás salidas se referían al gas nitrógeno. La masa total de nitrógeno entrante (excluyendo el lodo externo entrante) se dividió en orina, heces, agua de descarga de inodoros, aguas grises y agua de lluvia, con los siguientes supuestos: la orina contribuye 80% a la masa entrante total, la contribución de las heces se basa en 1,4 g N/persona/día, mientras que el agua de lluvia y el agua de descarga de los inodoros no contribuyen (Ven der Hoek *et al.*, 2018).

En análoga a lo anterior, los nitrógenos de lodos tratados se pueden recuperar con las tecnologías más convenientes que se pueden incorporar en las plantas de tratamiento de

aguas residuales existentes incluyen la precipitación de estruvita, el tratamiento del agua de rechazo del digestor por extracción de aire, filtración por membrana al vacío, filtración por membrana hidrofóbica y tratamiento del aire del secado térmico de lodos, los resultados son: 1.1% , 24%, 75%, 75% y 2.1% respectivamente, de recuperación de nitrógeno para el caso específico de la PTAR Amsterdam-West. Los efectos sobre la sostenibilidad fueron limitados, se podría lograr una mayor recuperación de nitrógeno al (60%) mediante la recolección separada de orina (Van der Hoek *et al.*, 2018).

A su vez, sobre la base de estos balances, las concentraciones en flujos específicos se pueden calcular y relacionar con el flujo de entrada de nitrógeno total a través del sistema (3932 ton N en el afluente, **773 ton N del lodo externo**, que comprende en total 4705 ton N). donde en la tabla 4 muestra los resultados. La orina tiene la mayor contribución y la mayor concentración. El volumen de orina y la contribución de masa supuesta al afluente (80%), la concentración es de 8800 mg N/l, El segundo flujo con una alta concentración es que el digestor rechaza el agua, a una concentración de 1030 mg N/l, este flujo contribuye con un 27% a la entrada total de nitrógeno (Ven der Hoek *et al.*, 2018),

Tabla 4. Concentración de nitrógeno y masa relativa de nitrógeno en cuatro flujos específicos (obtenido de Ven der Hoek *et al.*, 2018).

Flujo	Concentración (mg N /l)	Distribución relativa de flujo de entrada de N Total (%)
Orina	8800	67
Rechazo de agua del digestor	1030	27
influyente de PTAR	61	84
Efluente de PTAR	8.1	11

Igualmente, al observar la tabla anterior podemos decir que la recuperación de nitrógeno de estos flujos reducirá la carga de nitrógeno de la PTAR y, por lo tanto, dará como resultado un menor uso de energía y una menor emisión de N₂O, también muestra las concentraciones de nitrógeno en el afluente y el efluente de la planta de tratamiento, y la contribución relativa al flujo total de nitrógeno. El influyente tiene una gran contribución a una concentración relativamente baja.

4.3 Fósforo

Un dato importante nos proporciona, que el fósforo es un nutriente esencial para las plantas y constituye alrededor del 0.2% del peso seco de la planta (Jiang y Yuan, 2015; Schachtman et al., 1998 citado por Melia *et al.*, 2017).

Este nutriente fósforo en muchas veces es obtenido mediante diversas tecnologías, como también las que se registran avances en la creación de nuevas tecnologías para la recuperación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales o lodos. además, la recuperación de fósforo en instalaciones *in situ* como fosas sépticas y letrinas es posible tanto desde el punto de vista técnico como económico mediante la transformación de los residuos sépticos en fertilizante orgánico u orgánico-mineral (ONU, 2017).

4.3.1 De efluentes líquidos provenientes de tratamientos de aguas residuales.

Las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina, lodos fecales y entre otros) (ONU, 2017) dentro de los cuales se concentra **el fósforo** que se pueden recuperarlos en formas **que puedan aprovecharse en el riego del cultivo, pastos, agricultura, jardinería**, la reutilización segura después de ser tratados/depuradas.

A continuación, un estudio realizado por Ven der Hoek *et al.* (2018). En el balance de agua de la PTAR Amsterdam-West se mostró: El flujo entrante (1044,548 habitantes) consiste en el agua de descarga de los inodoros (31.7 L/persona/día), aguas grises (99.6 L/persona/día), orina (0.94 L/persona/día), heces (1.4 L/persona/día) y agua de lluvia. Para el agua de lluvia, se supuso que contribuía con un 20% al flujo entrante total. Teniendo el conocimiento de cuantos kg de fosforo se extrae por litro de agua residual tratada, ya se puede calcular la cantidad total de fósforo para una ciudad de población determinado.

También tenemos los siguientes datos específicos que nos dan a conocer la cantidad de fósforo, las concentraciones totales de fósforo que ingresan a una PTAR a menudo oscilan entre 3 y 11 mg/l, de fósforo. Si se considera una concentración de influente promedio de 7.5 mg/l de fósforo, entonces se procesan aproximadamente 0.34 Tg fósforo anualmente en los Estados Unidos. los fósforos en las aguas residuales se originan principalmente de

excretas humanas, desechos de alimentos y detergentes. En los EE. UU. Consumieron 1.8 Tg de fertilizante de fósforo en 2014 o aproximadamente 5 veces la masa de fósforo que se pasa a través de las PTAR. Sin embargo, **si la recuperación y la reutilización se implementaron por completo**, la demanda de fertilizante de fósforo de la roca de fosfato se puede reducir en un 20% (Hallas *et al.*, 2019).

Por consiguiente, la concentración total de fósforos con tratamiento secundario oscila entre 6 y 15 mg/l, equivalentes a 15-35 mg/l de P₂O₅. El fosforo queda retenido en el suelo progresivamente aumentando los niveles del mismo, esto permite disminuir la cantidad de fertilizantes aportado con fertilizantes comerciales en años sucesivos (Dias *et al.*, 2012).

En la figura 3, flujo de aguas residuales, apreciamos los componentes resultantes del tratamiento de aguas residuales, uno de ellos son los nutrientes tema de nuestro estudio, los mismos son recuperados de este proceso de tratamiento y aprovechados en la agricultura.

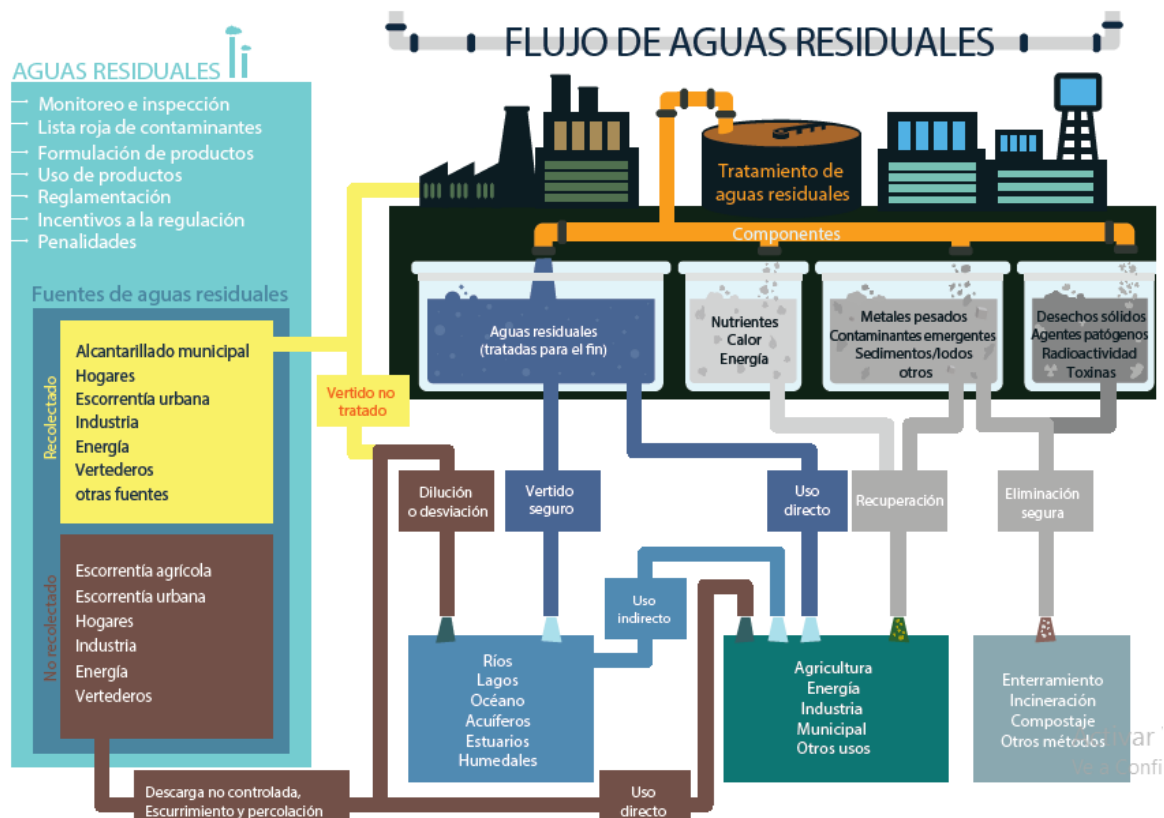


Figura 4. Flujos de aguas residuales – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017.

Con la finalidad de promover la sostenibilidad se aprovecha la oportunidad de seleccionar los nutrientes de las aguas residuales y darle un fin provechoso.

Por consiguiente, la implementación de la recuperación de fósforo durante el tratamiento de aguas residuales permite la separación del **fósforo ya disuelto**, aplicando tecnologías relativamente básicas. Por lo tanto, las corrientes laterales ricas en fósforo o el agua de proceso con concentraciones de fósforo 450 mg/l son económicamente factibles. Una **gran ventaja** de la recuperación de fósforo durante el tratamiento de aguas residuales es la posibilidad de combinarlo con la eliminación de fósforo. Las investigaciones de los últimos años demostraron que la recuperación de fósforo es particularmente exitosa en combinación con la eliminación biológica de fósforo en corrientes secundarias (líquido sobrenadante de la estabilización anaeróbica) o del agua de proceso durante el tratamiento de lodos. El agua rica en fósforo se alimenta a un tanque de precipitación/cristalización, donde el fósforo se elimina como fosfato de calcio o MAP (estruvita) agregando sales de calcio o magnesio y, cuando sea necesario, cristales de semillas (Cornel, 2011).

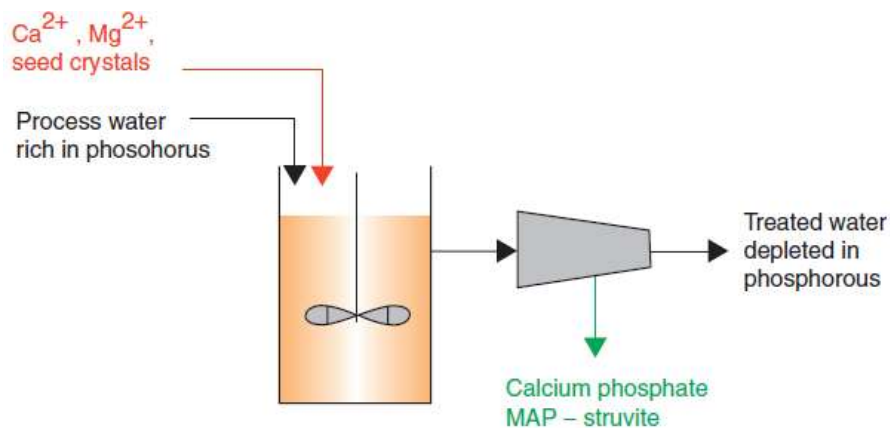


Figura 5. Recuperación de fósforo de la fase líquida durante el tratamiento de aguas residuales (Cornel y Schaum, 2009 citado por Cornel y Meda, 2011).

4.3.2 De lodos de depuradora - tecnología química húmeda

Los lodos de aguas residuales municipales contienen nutrientes y material orgánico que se necesitan en la agricultura como fertilizantes. La distribución de lodos de depuradora en los campos es la ruta más económica para la eliminación de biosólidos (Andersen y Sede 2002), y al mismo tiempo recicla los nutrientes (Nieminen, 2010).

A continuación, en la figura 6 vemos que el tratamiento químico húmedo de los lodos de aguas residuales implica que, en un primer paso, el fósforo unido en los lodos de aguas residuales se disuelve agregando **ácido o base**, en combinación con la temperatura, si es necesario. De este modo, en la mayoría de los casos, los metales (pesados) también se

vuelven a disolver. Después de la eliminación de los compuestos insolubles, el fósforo se puede separar del agua rica en fósforo, por ejemplo, mediante precipitación, intercambio iónico (Cornel y Meda, 2011).

En relación a lo anterior Petzet y Cornel (2013) informan que el 17 a 26% de una carga de fósforo total entrante, predominantemente en forma de partículas, puede transferirse al lodo primario en el asentamiento inicial en una EDAR (Melia *et al.*, 2017). No obstante, en la siguiente figura:

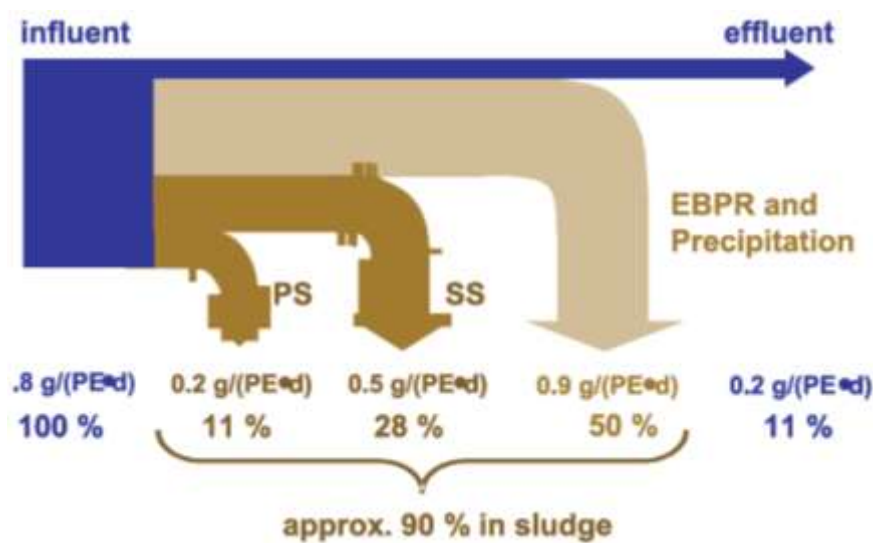


Figura 6. Balance de fósforo para una planta de tratamiento de aguas residuales municipales típica en Alemania con eliminación biológica de fósforo y/o precipitación. PS, lodos primarios; SS, lodos secundarios excedentes; EBPR, eliminación mejorada de fósforo biológico. (Schaum, 2007).

La Figura 6 muestra el balance de fósforo para una PTAR típica en Alemania. Aproximadamente el 11% del fósforo está separado por el lodo primario (PS) y el 28% por el lodo secundario (excedente) (SS) sin ninguna eliminación específica de fósforo. Por lo tanto, aproximadamente el 50% del fósforo tiene que ser eliminado por medio de la eliminación mejorada de fósforo biológico (EBPR), precipitación u otras técnicas de eliminación de fósforo.

Por otro lado, Schaum, (2007) para investigar la transferencia de aluminio, fósforo y calcio, las siguientes mezclas de sustancias puras se calentaron en un horno de mufla a $T_{max} = 500, 700$ y $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, realizo tratamiento térmico de mezclas de sustancias puras:

- “mezcla A” 10 g de fosfato de aluminio, 5 g de carbonato de calcio y 20 g de dióxido de silicio.
- “mezcla B” 10 g de fosfato de aluminio, 10 g de carbonato de calcio y 20 g de dióxido de silicio.

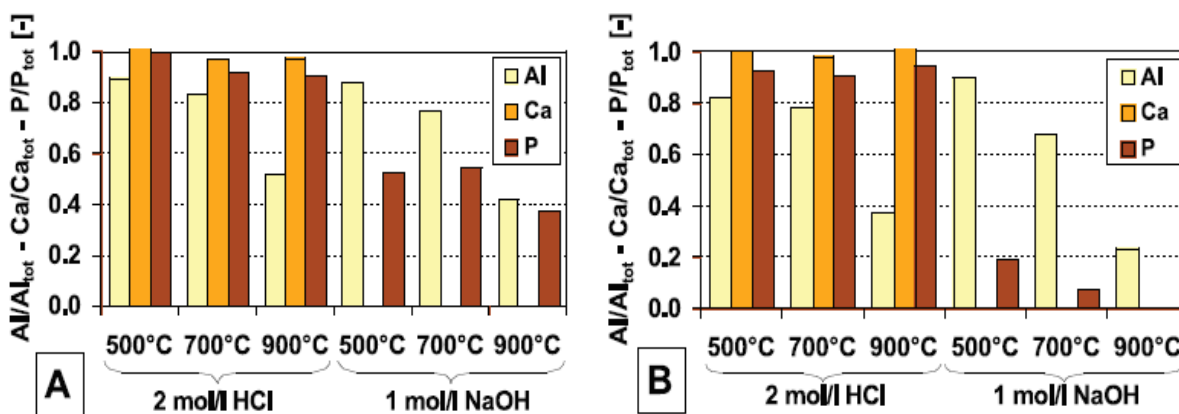


Figura 7. Liberación de aluminio, calcio y fósforo en mezclas de sustancias puras (fosfato de aluminio, carbonato de calcio, dióxido de silicio), después del tratamiento térmico a 500, 700 y 900 °C; mezcla A: $P_{tot}/Ca_{tot} \approx 1 \frac{1}{2}$ [mol/mol]; mezcla B: $P_{tot}/Ca_{tot} \approx \frac{3}{4}$ [mol/mol] (Schaum, 2007).

El tiempo de reacción fue de 2h c/u. obteniendo los resultados en la figura 7 las tasas de liberación de aluminio, calcio y fósforo, con diferentes temperaturas de incineración y diferentes proporciones de calcio (mezcla A y B). La liberación de fósforo por aumento de temperatura cambió significativamente solo en caso de elución alcalina (mezcla B) hay una disminución de las tasas de liberación de fósforo, cayendo a <1% a 900 °C. En contraste, con la elución ácida, la liberación de fósforo es casi del 100%, independientemente de la temperatura y el contenido de calcio (Schaum, 2007). La misma figura, presenta la solubilidad de fósforo y metales pesados en ácido sulfúrico con respecto al pH. Se puede ver que el pH neutro 7 disuelve el 10% del fósforo total. La proporción de fósforo disuelto aumenta linealmente a medida que disminuye el pH, el valor de pH 2 eluyendo el 90% del fósforo total.

De manera similar, el proceso químico húmedo libera fósforo unido química o biológicamente del lodo o ceniza de lodo con ácido o base. Como se presenta en la figura 8, el residuo no soluble se separa y la fase líquida restante se trata para separar el fósforo disuelto.

Los métodos incluyen precipitación, intercambio iónico, nanofiltración y extracción de líquido reactivo (Cornel y Schaum, 2009).

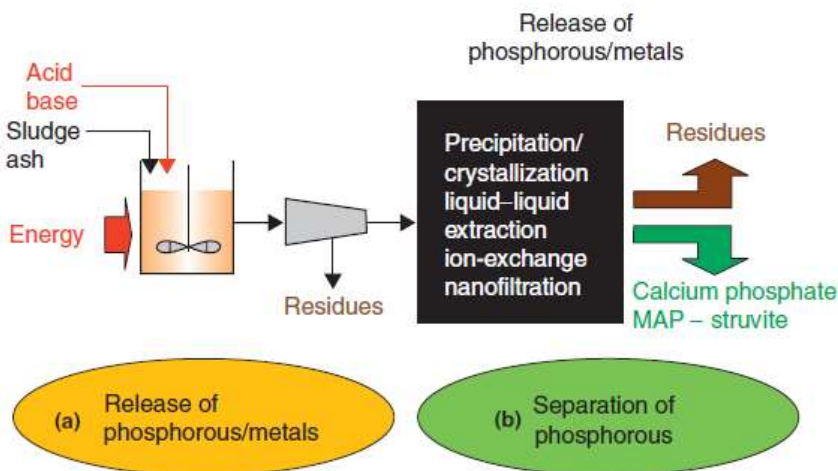


Figura 8. Principio del proceso químico húmedo (Cornel y Schaum, 2009).

En todo este proceso es conveniente emplear la lixiviación con ácido libera más fósforos en comparación con la lixiviación con base. Además, el tipo de material de alimentación no influye en el resultado de la lixiviación ácida. Donde se contrastó experimentos para **la liberación de fósforo** de las cenizas con NaOH, H₃PO₃, H₂SO₄ y HCl, descubriendo una lixiviación del 25%, 50%, 80% y 90% del fósforo total, respectivamente. Típicamente, **los procesos químicos húmedos usan ácido sulfúrico para la lixiviación** de fósforo (Bayerle 2009, Schaum et al. 2005).

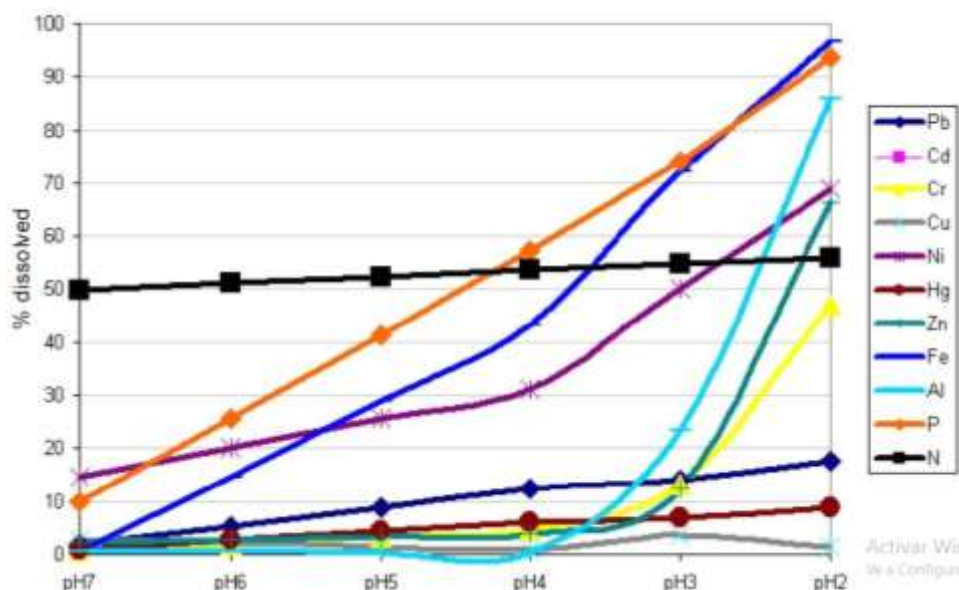


Figura 9. Componentes disueltos en lodo con respecto al valor de pH (Bayerle 2009 citado por Nieminen, 2010).

En la figura 9 el nitrógeno con respecto al valor de pH7 disuelto en lodo alcanza hasta el 50% así relativamente se va incrementando no llegando a más del 55% para un valor de pH2. Ahora en relación al fósforo disuelto en lodo tiene una relación indirecta respecto al valor del pH. Según la gráfica 9 observamos que para un valor de pH7 el fósforo disuelto en lodo es de 10%, pero para pH2 oscila hasta 94%, vemos que importante incidencia tiene la variación del valor del pH, a menor valor de pH mayor % de fósforo en lodo.

En relación a otro enfoque químico húmedo, el proceso SEPHOS (Precipitación secuencial de fósforo) se desarrolló en la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania), dicho proceso se basa en los estudios de Schaum (2007) sobre el enfoque **químico húmedo de la recuperación de fósforo de las cenizas de lodos de depuradora**. El primer paso del proceso SEPHOS es la elución de la ceniza con H_2SO_4 para alcanzar un valor de pH por debajo de 1.5 disolviendo el fósforo y la mayoría de los metales pesados.

Por consiguiente, el procesamiento posterior con el proceso SEPHOS avanzado que recupera el fosfato de calcio que se puede utilizar en la agricultura. El producto SEPHOS se trata con una base en pH 12-14. Esto disuelve el aluminio y el fosfato, pero la mayoría de los metales pesados permanecen sólidos y pueden separarse. El líquido rico en fósforo disuelto y aluminio se transfiere a un reactor donde una dosis de iones de calcio precipita fosfato de calcio (Schaum et al. 2005). Después de la eliminación del fósforo del líquido, el aluminio restante puede reutilizarse como precipitante en una EDAR. Los análisis del producto mostraron que el producto SEPHOS tenía un contenido de fósforo del 12%, mientras que el contenido de fósforo en la ceniza antes del tratamiento era del 9,8%.

4.3.3 De lodos de depuradora - tecnologías termoquímicas.

Las tecnologías termoquímicas se utilizan para eliminar metales pesados de las cenizas de lodos de depuradora. las cenizas son higiénicas, ya que las altas temperaturas en el proceso de incineración descomponen el material orgánico. Sin embargo, los metales pesados se concentran en las cenizas junto con el fósforo y pueden limitar la utilización como fertilizante (Petzet y Cornel, 2009). Un proyecto de reutilización sostenible y segura de lodos de aguas residuales municipales para la recuperación de nutrientes, estudió la posibilidad y las tecnologías para eliminar metales pesados de las cenizas de lodos de aguas residuales con el método que se muestra en la Figura 10.

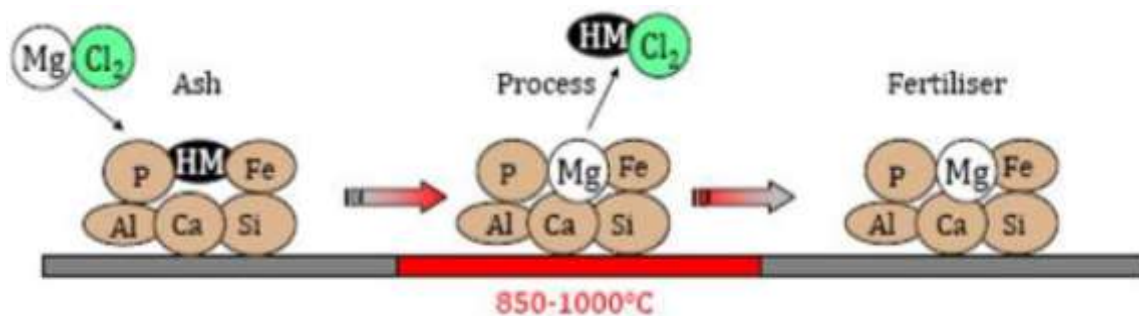


Figura 10. Principio del proceso termoquímico (Hermann 2009b citado por Nieminen, 2010).

La figura anterior nos muestra el proceso que utiliza aditivos de cloruro como sales alcalinas de la tierra, cloruro de magnesio y cloruro de calcio que reaccionan con metales pesados en la ceniza. Los cloruros de metales pesados se evaporan a medida que las temperaturas del proceso aumentan por encima del punto de ebullición de ellos. Las temperaturas típicas son entre 850 y 1000 °C. Los resultados del proyecto muestran tasas de eliminación de más del 90% de Cd, Cu, Hg, Pb y Zn. Además, el tratamiento térmico aumenta la biodisponibilidad del fósforo en las cenizas del 30 al 50% antes de la incineración hasta el 100%. Por lo tanto, el producto es adecuado para la producción de fertilizantes (Susan 2008 citado por Nieminen, 2010).

De manera similar, la empresa ASH DEC Umwelt AG, con sede en Austria, creó una tecnología para la incineración de lodos que logra destruir por completo los patógenos y contaminantes orgánicos. Le sigue un tratamiento **químico y térmico** donde se genera un fertilizante a base de cenizas con múltiples nutrientes, el cual se comercializa con la marca PhosKraft. Si se tienen en cuenta los costos de eliminación reducidos, el precio de producción es similar al de los fertilizantes comerciales. Se estima que el período de recuperación de la inversión en una planta a escala completa es de 3 o 4 años (Drechsel *et al.*, 2015^a citado por ONU, 2017). Lo que se necesita hoy en día son tecnologías que atenúen por completo todos los componentes que pueden causar riesgos.

Por otra parte, el tratamiento termoquímico de las cenizas de lodos produce residuos desintoxicados que actualmente son utilizados por la industria de fertilizantes. La extracción química en húmedo puede ser económicamente factible para recuperar fósforo y otros subproductos. La biodisponibilidad del fósforo recuperado depende del pH del suelo, así

como del material rico en fósforo en cuestión. La estruvita es un producto de fósforo recuperado superior en términos de disponibilidad de la planta, mientras el uso cenizas de lodos de depuradora tratados termoquímicamente se limita a suelos ácidos (Melia *et al.*, 2017).

Además, para utilizar cenizas de lodos de depuradora en la recuperación de fósforo, el lodo debe mono-incinerarse sin corteza, desperdicios sólidos u otro material agregado. La incineración es un método relativamente conocido para la eliminación de lodos: el 20% se elimina por incineración en Europa (Tabla 6).

Tabla 5. Producción de lodos de depuradora e instalaciones de mono-incineración en países seleccionados (ASH DEC 2009).

	Lodos de depuradora (t/a DS)	Compartimiento de mono-incineración (%)	Plantas operativas
USA	8200000	22	170
Europa	8330000	20	~ 80
Australia	245000	31	3
Alemania	2450000	28	23
Suiza	203000	47	14
Japón	3000000	50	100

Con respecto a la tabla anterior nos indica que, en el proceso de incineración, el fósforo se concentra en las cenizas. Un ejemplo de una planta de incineración de lodos de depuradora es Slibverwerking NoordBrabant (SNB), la planta de incineración de lodos más grande de Europa, ubicada en Moerdijk, la parte sur de los Países Bajos (Nieminen, 2010). SNB procesa más de 410 000 t/a de lodo. El lodo que contiene un 23% de sólido seco, durante el invierno y la primavera, la cantidad de lodo es mayor que en el verano. El lodo sale del pre-secadora con un contenido de sólidos secos del 35 al 40% y entra al horno de lecho fluidizado. La temperatura en el horno es de 850 a 900 °C. La producción de cenizas en SNB es de 36 000 t/a que contienen aproximadamente el 10% de fósforo (Korving, 2010 citado por Nieminen, 2010).

Por otro lado, también los métodos fisicoquímicos se han utilizado ampliamente para la eliminación y recuperación de especies de amonio de las corrientes de desechos en una forma utilizable para complementar la producción de amoníaco existente (Sancho, 2018)

Asimismo, la incineración usualmente involucra la descomposición completa de la materia orgánica por medio de la oxidación a dióxido de carbono. La incineración está sujeta a volatilización de nitrógeno, mientras que fósforo se conserva en el carbón o las cenizas (Libra et al., 2011 citado por Harder *et al.*, 2019).

4.3.4 Ejemplos y aplicaciones de recuperación de nutrientes (N-F).

El uso adecuado de agua tratada para la agricultura aumenta las oportunidades de seguridad alimentaria y puede ayudar a aliviar las tensiones provocadas por el aumento de la demanda de agua. Mas aun, la reutilización del agua puede generar nuevas oportunidades comerciales y apoyar el avance de una economía verde (ONU, 2017).

Los lodos de aguas residuales municipales contienen nutrientes y material orgánico que se reciclan para utilizar en la agricultura como fertilizantes. La distribución de lodos de depuradora en los campos es la ruta más económica para la eliminación de biosólidos (Andersen y Sede 2002 citado por Nieminen, 2010).

En el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, nos muestras en la tabla 6 el uso de aguas residuales tratadas, en la columna 1 recursos en excrementos y aguas residuales “nutrientes” en la columna 2 opciones de gestión de recursos “Reutilización combinada de agua y nutrientes, riego agrícola, forestal y acuicultura.

Tabla 6. Marco de gestión de aguas residuales desde una perspectiva de recursos
(Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017)

Recurso en excrementos y aguas residuales	Opciones de gestión de recursos	Opciones del sistema técnico	Múltiples beneficios potenciales
Nutrientes			Protección de la salud
	Reutilización combinada de agua y nutrientes	Gestión de excrementos a través del agua frente a no a través del agua	Protección del medio ambiente
	riego agrícola/riego forestal/acuicultura	Gestión separada de aguas grises	Seguridad del agua
		Gestión de lodos	Seguridad alimentaria

Riego con aguas residuales, la mayor parte de las aguas residuales tratadas, y parcialmente tratadas del mundo se destina al riego. Así como por ejemplo en Israel, el 40% del agua utilizada para el riego en 2011 provino de aguas residuales tratadas (OCDE, 2011b citado por ONU, 2017).



Figura 11. Reutilización de agua luego del tratamiento avanzado (terciario) a nivel mundial: Cuota de mercado por finalidad de uso – Adaptada del Informe mundial de ONU, 2017.

Con referencia, en el riego agrícola se emplean 32% de aguas residuales tratadas en los mismos están concentrados los nutrientes como nitrógeno y fósforo, es el mayor porcentaje

en comparación con la utilización con otras actividades o finalidad, seguido el 20% en riego de jardines, no obstante, el riego de estas finalidades requiere nutrientes (N-F) para su mayor producción o confort. asimismo, el 8% en mejoras ambientales, las aguas recuperadas (luego del tratamiento «adecuado a los fines») puede ser una fuente confiable y sostenible.

Por ello, de fomentar la seguridad alimentaria, la reutilización del agua en la agricultura puede generar grandes beneficios para la salud, entre ellos, un mayor valor nutricional (ONU, 2017). Esta práctica ha tenido más éxito en zonas urbanas y periurbanas, donde hay una gran disponibilidad de aguas residuales, por lo general, sin costo alguno y donde hay una mayor demanda de productos agrícolas. Riego enriquecido de nutrientes para cultivos y jardines (Días *et al.*, 2012).

Si bien es cierto, El uso activo y directo de las aguas residuales y sus nutrientes es habitualmente generado por necesidad, pero en muchas regiones desarrolladas también se ha documentado su uso para actividades recreativas (ONU, 2017).

Tal es el caso, la agricultura requiere mayor cantidad de agua que otros usos, como el doméstico o el industrial; sin embargo, para el uso de aguas residuales debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública (Silva *et al.*, 2008).

Aunque la irrigación para fines agrícolas representa apenas 10% del agua usada, esta es la actividad de mayor consumo de agua dulce del planeta (Fao y Fida, 2006 citado por Silva *et al.*, 2008). Las aguas residuales tratadas contendrán normalmente menos N y P. La actividad agrícola demanda agua residual por la necesidad de un abastecimiento regular que compense la escasez del recurso, por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua a lo largo del año (Lara y Hernández, 2003 citado por Silva *et al.*, 2008); adicionalmente, el uso de aguas residuales presenta beneficios asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N y P) y oligoelementos, como Na y K, permitiendo reducir, y en algunos casos eliminar, la necesidad del uso de fertilizantes químicos y trayendo beneficios económicos al sector.

Tabla 7. Consumo de nutrientes por diversos cultivos.

Cultivo	Consumo de nutrientes (Kg/ha/año)		
	N	P	K
Cultivo de forraje			
Alfalfa	225-538	23-37	174-225
Trébol	178	18	101
Festuca	152-325	30	300
<i>Orchard grass</i>	258-281	23-56	253-353
Cultivos de campo			
Cebada	71	17	23
Maíz	174-193	19-28	108
Caña	80-200	50-90	100-120
Algodón	74-112	14	39
Sorgo	135	16	70
Papa	260	23	247-323
Soya	44-106	13-21	33-54
Trigo	56-91	17	5-21

Fuente: Metcalf y Eddy, 2003; *Gonzales, 2004 citado por Silva *et al.*, 2008).

Por otra parte, La solubilidad mínima de la estruvita, que indica las circunstancias óptimas para la precipitación, se produce por encima de pH 8,5 (Figura 11).

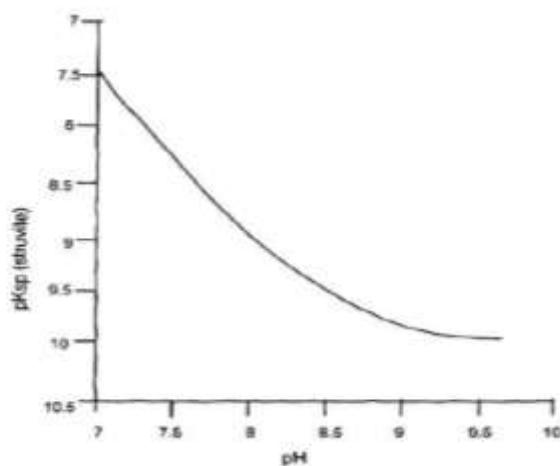


Figura 12. Solubilidad de estruvita vs pH (Koch *et al.* 2009 citado en Nieminen, 2010).

Dado que, la estruvita contiene dos nutrientes primarios, **fósforo y nitrógeno**, y un nutriente secundario de magnesio, sería beneficioso recuperar el fósforo como estruvita para la industria de fertilizantes (Nieminen, 2010). lo que hace que la estruvita sea adecuada para uso agrícola como fertilizante de liberación lenta. En su artículo (Kern *et al.*, 2008) concluyen que la proporción de estruvita soluble en agua es aproximadamente 3.6% y la

estruvita soluble en ácido cítrico 98.8%. La absorción de fósforo de las plantas examinadas, maíz y trigo, fue de 66.7% y 85.9%, respectivamente.

Además, el nitrógeno presente en los vertidos le ha permitido eliminar casi completamente la necesidad de utilizar **fertilizantes** en la cancha de golf, como resultado del aprovechamiento de los vertidos en Sydney, Australia (ONU, 2017).

4.4 Recuperación de nitrógeno en investigación

En los últimos años han surgido varias innovaciones tecnológicas que permitirían incrementar la eficacia en la recuperación de nutrientes (Para recuperar nitrógeno de las aguas residuales o lodos cloacales se necesitan tecnologías de punta, que, si bien siguen en la etapa de desarrollo, han avanzado mucho en los últimos años. Son cada vez más los casos donde (p. ej. Bangladesh, Ghana, India, Sudáfrica, Sri Lanka, etc.) las municipalidades participan en la deshidratación de los lodos cloacales, cocompostaje y granulación seguros (Nikiema *et al.*, 2014 citado por ONU, 2017). Algunos estudios sobre la recuperación de múltiples recursos muestran que es posible obtener más beneficios económicos.

Además de los beneficios económicos tangibles, la recuperación de nitrógeno mejorada también reduciría el nitrógeno liberado a la atmósfera (Sengupta *et al.*, 2015 citado por ONU, 2017). Si bien aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, también están surgiendo tecnologías innovadoras para recuperar otros nutrientes y minerales valiosos, como la recuperación de metales mediante procesos bioelectroquímicos (Wang y Ren, 2014 citado por ONU, 2017).

Al mismo tiempo, existen muchas otras iniciativas además de la recuperación de nitrógeno y la reutilización de nitrógeno para hacer que el tratamiento de aguas residuales sea más sostenible (Van der Hoek *et al.*, 2018). Dentro de las posibilidades de recuperación y reutilización de nitrógeno, también pueden existir intervenciones y tecnologías sinérgicas o neutrales en competencia, lo que resulta en bloqueos (medidas que son mutuamente excluyentes), medidas sin arrepentimiento (medidas que no limitan el número de opciones después de una decisión) y medidas de ganar-ganar (medidas que son significativas para más de una estrategia).

Dentro de este marco, algunos de ellos ya han sido probados y utilizados en una base a gran escala, como la formación de estruvita o la eliminación de amoníaco. Otros, como la reducción de volumen por evaporación, congelación parcial u ósmosis inversa, solo se han probado en laboratorios (Maurer *et al.*, 2002 citado en 2003). En el manejo de aguas residuales municipales, las únicas corrientes de desechos líquidos con altas concentraciones de nitrógeno son los líquidos de deshidratación de lodos (sobrenadante del digestor), que contienen aproximadamente del 15 al 20% de la carga total de nitrógeno en las aguas residuales, y la orina humana, que contiene aproximadamente el 80% del nitrógeno total carga (Tabla 8).

Tabla 8. Valores típicos para los principales nutrientes en la orina. Basado en números en texto y Ciba Geigy (1977 citado por Maurer *et al.*, 2003) con concentraciones características en orina de adultos

Elemento	En orina (%)	En orina (g*PE/d)	Típico conc. (g*m3)	Típico conc. (mmol/L)
N	80	8.8	8180	584
P	50 - 80	0.7	670	21.6
K	80 - 90	2.3	2160	55.2

Por otra parte, las ideas expuestas por Sancho (2018) se dedica al estudio y la validación de un nuevo concepto de tratamiento de la configuración del plan de tratamiento de aguas residuales, basado en la mejora de la recuperación de recursos de aguas residuales a menor costo y de manera sostenible. Se estudió la integración de una etapa de preconcentración para redirigir el carbono (basado en bio-sorción) y una unidad de intercambio iónico con el propósito de recuperar las formas inorgánicas de nitrógeno (por ejemplo, amonio) en una planta piloto instalada en una PTAR en España.

Por su parte, la investigación se basa en la evaluación de una configuración alternativa de PTAR que presenta una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales. La bio-sorción como un proceso de redirección de carbono (etapa A) y el intercambio iónico mediante el uso de zeolitas como sistema de recuperación de nitrógeno (etapa B) se validan experimentalmente a escala de laboratorio y piloto. Por su parte el trabajo experimental se realizó en la EDAR de Vilanova i la Geltrú (Barcelona, España), donde se diseñó, construyó

y operó una planta piloto durante 18 meses. La evaluación inicial de los procesos de redirección de carbono y recuperación de nitrógeno se llevó a cabo a escala de laboratorio (Sancho, 2018).

De las evidencias anteriores, se requiere más investigación en este sentido para aumentar el porcentaje de recuperación de nitrógeno. A pesar de esto, el factor de concentración ha alcanzado altos niveles ($CF = 30-60$) (Sancho, 2018).

Al respecto, aparecen nuevas tecnologías que permiten mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales transformándolas en «fábricas» donde se separan los materiales entrantes hasta obtener unidades independientes de amoníaco (Matassa *et al.*, 2015).

Mientras tanto, en la actualidad, hay muchas tecnologías disponibles para recuperar nitrógeno de las aguas residuales, (Van der Hoek *et al.*, 2018) estas tecnologías se pueden dividir en cuatro estrategias para recuperar y reutilizar el nitrógeno:

- tecnologías con el objetivo de recuperar nitrógeno directamente de las aguas residuales o el digestor rechazan el agua;
- tecnologías con el objetivo de concentrar nitrógeno en aguas residuales o digestores rechazan el agua para mejorar las tecnologías de recuperación;
- tecnologías para tratar orina o lodo;
- tecnologías con el objetivo de incorporar nitrógeno en la biomasa.

Con relación al lodo digerido se trata con ácido, los sólidos orgánicos se separan y pueden quemarse, de la fase líquida libre de metales pesados el nitrógeno y el fósforo se precipitan como estruvita después de aumentar el pH mediante la adición de hidróxido de magnesio, esto es lo que hace el proceso Seaborne, combinación de pasos de proceso recientemente desarrollados y conocidos, vinculados entre sí a un proceso complejo. En principio, permite el reciclaje de nitrógeno y fósforo de lodos de depuradora y otros desechos orgánicos que contienen metales pesados. Por lo tanto, representa un proceso interesante e innovador para el reciclaje de nitrógeno y fósforo del lodo de aguas residuales con la posterior producción de fertilizantes (Müller, 2011).

4.5 Recuperación de fósforo en investigación

Los nuevos conocimientos y tecnologías se están desarrollando continuamente, como lo demuestra el número y el alcance de las revisiones recientes publicadas en la literatura científica; consulte la Tabla 9 Estas revisiones proporcionan información detallada sobre ciertos aspectos de la recuperación de nutrientes. Sin embargo, es un desafío identificar patrones y oportunidades generales en el campo como un todo, cuando los detalles técnicos o ciertas tecnologías se estudian de forma aislada.

Tabla 9. Ejemplos de revisiones anteriores sobre la recuperación de nutrientes encontrados en excreta humana y corrientes que contienen excreta humana.

Tecnología	Referencia (s)
Recuperación de fósforo	Balm er (2004); Cornel and Schaum (2009); Petzet and Cornel (2011); Rittmann, Mayer, Westerhoff, and Edwards (2011); Sartorius et al. (2012); Desmidt et al. (2015); Egle et al. (2015); Karunanithi et al. (2015); Cieslik and Konieczka (2017); Melia et al. (2017)
Cristalización de estruvita	Doyle and Parsons (2002); Le Corre, Valsami-Jones, Hobbs, and Parsons, (2009); Rahman et al. (2014); Kumar and Pal (2015); Darwish, Aris, Puteh, Abideen, and Othman (2016)
Separación de membrana	Lutchmiah, Verliefe, Roest, Rietveld, and Cornelissen (2014); Xie, Shon, Gray, and Elimelech (2016); Ansari, Hai, Price, Drewes, and Nghiem (2017)
Sorción	Wang and Peng (2010); Loganathan, Vigneswaran, Kandasamy, and Bolan (2014)
Saneamiento ecológico	Winker, Vinnerås, Muskolus, Arnold, and Clemens (2009); Haq and Cambridge (2012); Roy (2017)
Sistemas biológicos	Nancharaiiah et al. (2016); Puyol et al. (2017)
Crecimiento fototrófico de biomasa	Hulsen, Batstone, and Keller (2014); Sukacova and Cervený (2017); Abinandan, Subashchandrabose, Venkateswarlu, and Megharaj, (2018); Santos and Pires (2018)
Sistemas bioelectroquímicos (BES)	Kelly and He (2014); Rodríguez Arredondo et al. (2015); Nancharaiiah et al., (2016)
BES aplicado a la orina	Ledezma, Kuntke, Buisman, Keller, and Freguía (2015)
Recuperación de nutrientes de la orina.	Monfét, Aubry, and Ramírez (2017); Vaneckhaute et al. (2017)
Recuperación de nutrientes de las aguas residuales.	Batstone, Hülse, Mehta, and Keller (2015); Mehta et al. (2015)
Recuperación de nutrientes de las cenizas de incineración de lodos de depuradora (SSA)	Donatello and Cheeseman (2013)

Estas revisiones generalmente se han centrado en un nutriente específico (especialmente fósforo), tecnología de recuperación (por ejemplo, separación de membrana), flujo de entrada (por ejemplo, orina) o una combinación de los mismos. Tenga en cuenta que esta lista no es exhaustiva (citado por Harder *et al.*, 2019).

El trabajo de Harder *et al.*, (2019) presenta una revisión con el objetivo de facilitar el diseño de la gestión de excretas humanas para la máxima recuperación de nutrientes, y que pueda servir como base para organizar y categorizar la información para un intercambio y una consolidación más efectivos. La necesidad de una mejor gestión de los nutrientes ha impulsado los esfuerzos hacia un reciclaje más completo de los nutrientes contenidos en los excrementos humanos a la agricultura. Existen posibilidades de explorar cómo maximizar la recuperación de nutrientes combinando rutas y productos individuales e incluyendo una gama más amplia de nutrientes

Al reconocer que la recuperación integral de nutrientes tendrá que convertirse nuevamente en una función clave del manejo de excretas humanas para ayudar a revitalizar la seguridad del suelo y los alimentos, ¿qué tipo de sistema de producción se contempla como receptor de nutrientes y materia orgánica? Aun así, solo hay poca investigación. Sería útil realizar más investigaciones sobre los efectos de los nutrientes (Harder *et al.*, 2019).

De manera similar, un proyecto de investigación “una evaluación tecnológica, ambiental y económica comparativa integrada de las tecnologías de recuperación de P” desarrollo (Egle *et al.*, 2016), Este trabajo se centra en tecnologías diseñadas para recuperar P de aguas residuales municipales, lodos de depuradora (SS) y cenizas de lodos de depuradora (SSA). Los presupuestos nacionales de P en Europa Central muestran que las aguas residuales municipales contienen una carga de P que teóricamente podría reemplazar del 40 al 50% del fertilizante mineral P aplicado anualmente en la agricultura (Zoboli *et al.*, 2015 citado por Egle *et al.*, 2016).

En cuanto, se investigaron cuatro pequeños PTAR en el norte de Florida, EE. UU., Con capacidades de tratamiento de 371 a 2650 m³ de aguas residuales/d y cargas de P entrantes de 2 a 14 kg/d por su potencial para producir estruvita a partir de filtrados de digestor. Se usó un modelo de **equilibrio químico** para predecir la viabilidad de la producción de estruvita y los resultados en comparación con las mediciones reales de filtrado de PTAR. Los filtrados de los digestores aeróbicos podían formar estruvita si el pH de la solución aumentaba en 1 unidad de pH. Dependiendo del PTAR, la recuperación de P en los filtrados a través de la precipitación de estruvita varió de 27 a 57% en masa a pH 8,5, mediante adiciones de **NaOH o rociado de aire**. El aumento de las concentraciones de filtrado de Mg mejoró la recuperación de P hasta el 97%. En base a estos resultados, los pequeños PTAR

que utilizan la digestión aeróbica podrán reducir su producción de residuos de fósforo a través de la recuperación como fertilizante de estruvita (Hallas *et al.*, 2019).

Por último, los Investigadores del Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la URJC y del departamento de Innovación y Tecnología de FCC Aqualia han desarrollado un nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales basado en la economía circular. Recientemente ha surgido este enfoque nuevo novedoso de fotobiorrefinería tipo carrusel en el cual Los resultados obtenidos son trascendentales, por lo que FCC Aqualia continuará apostando por el desarrollo de esta tecnología, en colaboración con el GIQA, para maximizar el aprovechamiento del agua residual como recurso de nutrientes y promover un uso más sostenible de los recursos hídricos. “Actualmente están construyendo la planta demostrativa sobre la tecnología de bacterias PPB (*Purple Phototrophic Bacteria*). más grande del mundo, donde la materia orgánica y los nutrientes serán transformados en bioenergía y/o fertilizantes orgánicos” (Puyol, 2018).

5. CONCLUSIONES

- La recuperación de una fuente del nutriente de P cada vez más se hace necesario, toda vez que un 22% en promedio de la demanda mundial de P podría satisfacerse con el reciclaje de las heces y orina humana en todo el mundo.
- La orina humana contiene agua en 90% el resto es sólido orgánico, de los cuales el 14-18% es el contenido de N, aproximadamente 85% de N se fija en la urea, en las heces humanas contiene el 25% de material solido en peso, el N del 5 a 7% de los sólidos secos, en general la orina contiene la mayoría de N y aproximadamente la mitad de P y K, mientras que las heces humanas son ricas en P. en consideración prioritaria a lo anterior los límites de descarga de nitrógeno son cada vez más exigentes el requerimiento de energía es muy alta para recuperar nutrientes, además de consumir mucha energía necesita grandes cantidades de producto químico. Por todas estas razones se hace imprescindible emplear tecnologías para la recuperación de nutrientes de las aguas residuales en las PTAR, el desafío es encontrar no solo una solución efectiva sino también económica y sostenible.

- Se viene desarrollado diversas tecnologías que recuperan nutrientes como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales domesticas o municipales, como las tecnologías químicas húmedas y termoquímicas de lodos de depuradoras, también de reutilización directa de nutrientes provenientes de la línea de líquidos tratados.
- De lo desarrollado por diversos autores se establecen que las cantidades de nutrientes recuperados son diferentes por tipos de tecnología y método de recuperación para el caso de nitrógeno después de un tratamiento secundario varía entre 10 y 60 mg/l, la contribución de las heces se basa en 1,4 g N/persona/día de los cuales se puede recuperar en 15% de nitrógeno en línea de líquidos, en caso de lodos tratados los nitrógenos se pueden recuperar con las tecnologías: filtración por membrana al vacío y por membrana hidrofóbica de 75% en ambos casos. Con respecto al fosforo, las corrientes laterales ricas en fósforo con concentraciones de fósforo 450 mg/l y en condiciones normales con tratamiento secundario oscila entre 6 y 15 mg/l de P, una concentración de influente promedio de 11.5 mg/l de P que son originados de excretas humanas, mediante la tecnología EBPR se podría recuperar un 50% de fósforo de lodos de depuradora.
- En los trabajos que recién están en investigación otros que se están desarrollando a nivel piloto, los autores desafían indicando que hay varias formas, procesos y/o tecnologías innovadoras en competencia como la reducción de volumen por evaporación, congelación parcial u ósmosis inversa que solo se han probado en laboratorio que podrán recuperar los nutrientes como el nitrógeno (recuperar las formas inorgánicas de nitrógeno (por ejemplo, amonio)), y fósforo hasta un 97% en masa a pH con adiciones de NaOH o rociado de aire. Existen posibilidades de explorar cómo maximizar la recuperación de nutrientes combinando rutas y productos individuales e incluyendo una gama más amplia de nutrientes incrementar el porcentaje de recuperación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila J., Laos A., y Verano R. (2018). *Remoción de nitratos y fosfatos por cepas nativas de Chlorella sp. (Chlorellaceae) y Chlamydomonas sp. (Chlamydomonadaceae) libres e inmovilizadas en aguas residuales municipales*. Artículo de investigación, Universidad Ricardo Palma. Ciudad Universitaria, Av. Venezuela cuadra 34, Lima, PERÚ, Obtenido de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S241332992018000200010
- Ashley K., Cordell D., y Mavinic D. (2011). Una breve historia del fósforo: de la piedra filosofal a la recuperación y reutilización de nutrientes. Publicado en El Servier. Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of British Columbia, 6250 Applied Science Lane, Vancouver, BC, Canada V6T 1Z4, b Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney, PO Box 123 Broadway, NSW 2007, Australia.
- Baeza R., Segura M., Contreras J., Eymar A., García C., Moreno J., y Suarez F. (2012). *Gestión Sostenible de la Reutilización de Aguas Residuales Urbanas en los cultivos hortícolas*. Intitulo de Investigación y formación Agraria y Pesquera, Consejería de agricultura, Pesca y Medio Ambiente – Unión Europea.
- Cornel P., Meda A., y Bieker S. (2011). *Aguas residuales como fuente de energía, nutrientes y agua de servicio*. Technische Universität Darmstadt, Alemania.
- Cornel P., y Schaum C. (2009). *Recuperación de fósforo de aguas residuales: necesidades, tecnologías y costos*. Instituto de Tecnología de aguas residuales, Technische Universität Darmstadt, Alemania.
- Días E.; Alvarado G.; Camacho K. (2012). *El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México*.

- Egle L., Rechberger H., Krampe J., y Zessner M. (2016). *Recuperación de fósforo de aguas residuales municipales: una evaluación tecnológica, ambiental y económica comparativa integrada de las tecnologías de recuperación de P*. Artículo de investigación. Instituto de Calidad del Agua, Recursos y Gestión de Residuos, Viena – Austria.
- Hallas J., Mackowiak C., Wilkie A., Harris W., (2019). *Recuperación de fósforo de estruvita de aguas residuales municipales digeridas aeróbicamente*. Artículo de investigación, Universidad de Florida – IFAS – USA.
- Harder R., Wielemake R., Larsen T., Zeeman G., y Öberg G. (2019). *Reciclaje de nutrientes contenidos en los excrementos humanos para la agricultura: vías, procesos y productos*. Artículo de Investigación. Pathways, processes, and products, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, obtenido de: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1558889>
- Hu Z., Huweling D., y Dold P. (2015). *Eliminación de nutrientes biológicos en el tratamiento de aguas residuales municipales*. Artículo de Investigación, nuevas direcciones en sostenibilidad. Obtenido Journal of Environmental Engineering de: <https://www.researchgate.net/publication/273024416>
- Lassaletta L. (2016). *Flujos superficiales de nutrientes en una cuenca agrícola de Navarra*. Tesis Doctoral. Madrid – España.
- Letón P. (2015). *El agua residual doméstica como fuente de recursos*. Publicado por Remtavares. Universidad de Alcalá de Henares – Madrid - España Obtenido de: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/04/22/132186>
- Limón J. (2013). *los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* Guadalajara, Jalisco -México.
- Maurer M., Schwegler P., y Larsen T. (2003). *Nutrientes en la orina: aspectos energéticos de eliminación y recuperación*. IWA Publishing - Environmental Engineering Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf, Switzerland.

- Melia P., Cundy A., Sohi S., Hooda P., Busquets R. (2017). *Tendencias en la recuperación de fósforo en formas biodisponibles de aguas residuales*. Artículo de Investigación. Kingston Facultad de Ciencias, Ingeniería y Computación. Universidad Kingston Upon Thames – Reino Unido. obtenido de: www.elsevier.com/locate/chemosphere
- Metcalf y Eddy (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición, Volumen I, versión en español.
- Metcalf y Eddy (2003). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento y reuso*. Cuarta edición, Volumen I, versión en español.
- Mulet J. (2018). El nitrógeno es vida. Publicado el 22 de febrero en el diario El País Semanal - edición América. Obtenido de: https://elpais.com/elpais/2018/02/12/eps/1518453820_373752.html
- Müller J., Günther L., Dockhorn T., Dichtl N., Phan C., Urban I., Weichgrebe D., Rosenwinkel K., y Bayerle N. (2014). *Reciclaje de nutrientes de lodos de depuradora mediante el proceso marítimo*. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Técnica de Braunschweig – Alemania
- Nieminen J. (2010). *Recuperación y reciclaje de fósforo de lodos de aguas residuales municipales*. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad de Aalto, Escuela de Ciencia y Tecnología, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. - Aalto Universidad -Espoo-Finlandia.
- ONU (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. Aguas Residuales El Recurso Desaprovechado. Paris. Obtenido de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Puyol D., (2018). Bacterias para recuperar nutrientes y energía en aguas residuales domésticas. Informe de investigación, Investigadores del Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la URJC y del departamento de Innovación y Tecnología de FCC AQUALIA – Alcalá de Henares- España. Obtenido de: <https://www.urjc.es/todas-las-noticias-de-actualidad/3494-bacterias-para-recuperar-nutrientes-y-energia-en-aguas-residuales-domesticas>

- Sancho I. (2018). *Hacia la planta de tratamiento de aguas residuales del futuro: integración de las tecnologías de redirección de carbono y recuperación de nitrógeno*. Tesis presentada para obtener el grado de doctor. Departamento de Ingeniería y Mecánica. Universidad Politécnica de Catalunya – Barcelona Tech. Barcelona – España.
- Silva J., Torres P., Madera C. (2008). *Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión*. Programa de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali - Colombia.
- Shaddel S., Bakhtiary H., Kabbe C., Dadgar F., y Østerhus S. (2019). *Gestión sostenible de lodos de depuradora: De las prácticas actuales a los nutrientes emergentes*. *Tecnologías de recuperación*. 21 de junio de 2019 - Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Ciencias de Noruega.
- Shawn Whitmer, Heather Jennings (2015). *Cambios en los nutrientes de las aguas residuales generan ahorros para los dueños de palanta de papel*. Artículo publicado en Agosto por Pulp & Paper Internacional. Obtenido de: <file:///E:/UAHMHYGESTION%20DE%20RECURSOS%20HIDRICOS/TRABAJO%20FIN%20DEL%20MÁSTER/tesis/En-Español/03-Cambios-en-los-Nutrientes-de-las-Aguas-Residuales-Generan-Ahorros-Para-los-Dueños-de-Plantas-de-Papel.pdf>
- Schaum C., Cornel., Jardin N. (2007). *Recuperación de fósforo de cenizas de lodos de depuradora: un enfoque químico húmedo*. Instituto de Tecnología de aguas residuales, Institut WAR, Tecnología de aguas residuales – Alemania.
- Van der Hoek J., Duijff R., y Reinstra O. (2018). *Recuperación de nitrógeno a partir de aguas residuales: posibilidades, competencia con otros recursos y vías de adaptación*. *Artículo de investigación*. Departamento de Gestión del Agua, Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, Universidad Tecnológica de Delft, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, Países Bajos.