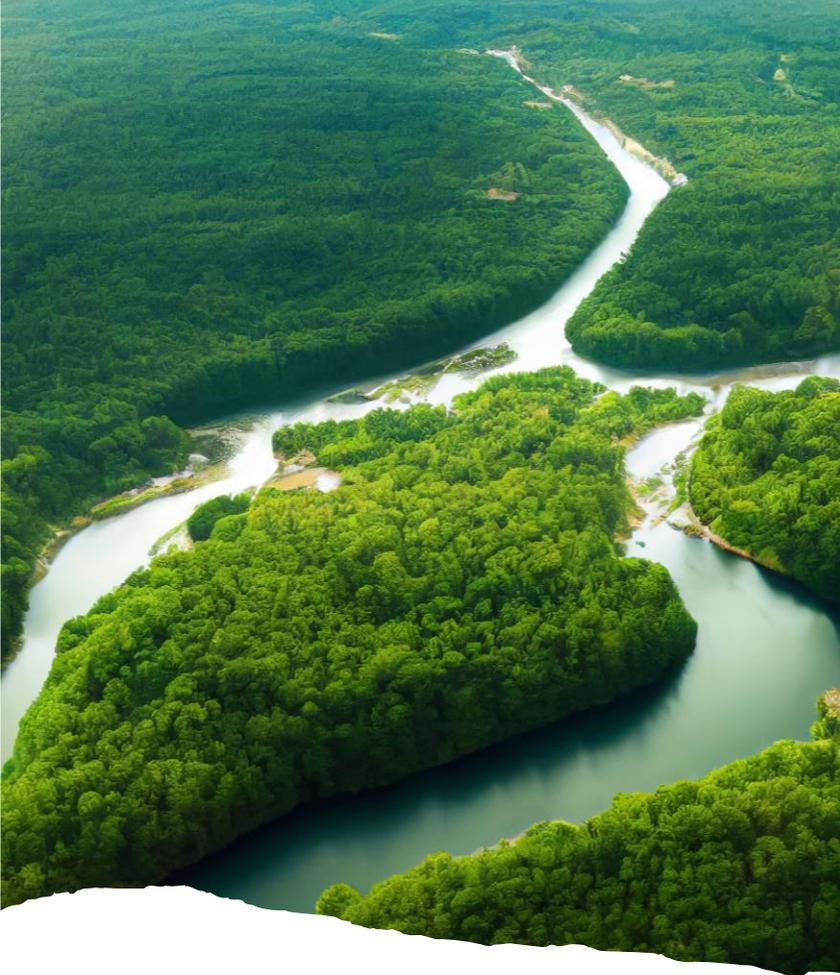




Economía circular en el sector de agua potable y saneamiento:  
Aprovechamiento de metano y eficiencia energética en municipios  
seleccionados de México



## Estimación de Inversiones para el aprovechamiento de metano en el tratamiento de aguas residuales para América Latina y el Caribe

Alfredo Montañez– Economista y consultor de la CEPAL



NACIONES UNIDAS

CEPAL

División de Recursos Naturales



United Nations  
Peace and Development Trust Fund



# Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe

Silvia Saravia Matus  
Marina Gil Sevilla  
Diego Fernández  
Alfredo Montañez  
Elisa Blanco  
Lisbeth Naranjo  
Alba Llavona  
Natalia Sarmanto

## Objeto del estudio

- Estimar el potencial energético del aprovechamiento del metano en 75 PTAR con capacidades entre 500 l/s y 4.000 l/s que atienden a 33 millones de personas distribuidas en el Estado Plurinacional de Bolivia, Colombia, Costa Rica, México y Perú.
- Determinar las inversiones necesarias y los beneficios económicos, sociales y ambientales de la recuperación de metano y la generación eléctrica.



CEPAL

División de Recursos Naturales

United Nations  
Peace and Development Trust Fund

# Metodología empleada

Estimación de costos de inversión para la generación de energía.

Análisis de viabilidad financiera en cada PTAR.

Análisis de beneficios sociales y ambientales.

Se determina el tipo de inversión y se estima el costo asociado, en función de:

- Tecnología de la PTAR.
- Capacidad instalada.

Se realiza un análisis de la relación beneficio/costo de las inversiones a partir de:

- Ahorros de energía
- Horizonte temporal de 20 años
- Análisis en términos de Valor Presente

Haciendo uso de las Matrices Insumo Producto de la CEPAL, se estimó:

- Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.
- Generación de empleos.
- Crecimiento del Valor agregado.



# Requerimientos de inversión

Tipo de inversión	Sistemas Compactos		Sistemas Lagunares	
	Aerobios	Anaerobias	Aerobios	Anaerobias
1- Obra de Profundización			✓	
2- Cubierta de PEAD			✓	✓
3- Sistema de bombeo y espesamiento de lodos	✓			
4- Digestor anaerobio de lodos	✓			
5- Ruteo, almacenamiento y purificación de biogás	✓	✓	✓	✓
6- Motogenerador a biogás	✓	✓	✓	✓
7- Circuito de aprovechamiento de energía calórica	✓	✓	✓	✓
8- Estación de transformación eléctrica	✓	✓	✓	✓



Total  
USD 251,14  
millones

Costa Rica  
8,9



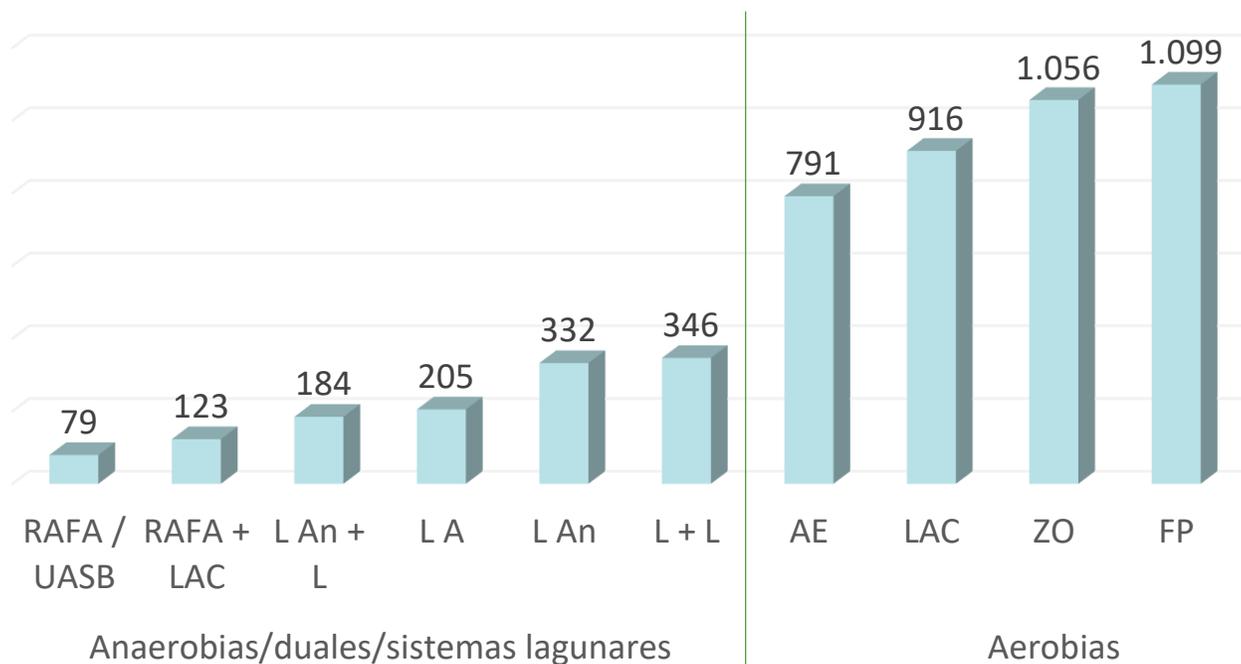
Perú  
21,2

Bolivia  
4,4

Inversión necesaria  
para el aprovechamiento  
de metano de las PTAR  
seleccionadas  
(Millones de USD)



# Costos de inversión por MWh de energía eléctrica generable al año por tipo de tecnología de tratamiento (En dólares)



## Significado de las siglas

Tecnología	Id Tecnología
Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	RAFA / UASB
Reactor Anaerobio Flujo Ascendente y Lodos Activados	RAFA + LAC
Lagunas anaerobias + Lagunas de otros tipos	L An + L
Lagunas aireadas - aerobias	L A
Lagunas anaerobias	L An
Otras combinaciones de lagunas en serie	L + L
Aireación Extendida	AE
Lodos Activados Convencionales	LAC
Lodos Activados Convencionales	ZO
Filtro percolador / Lecho percolador / Filtro biológico	FP
Aireación Extendida con Desnitrificación	AE - Dn





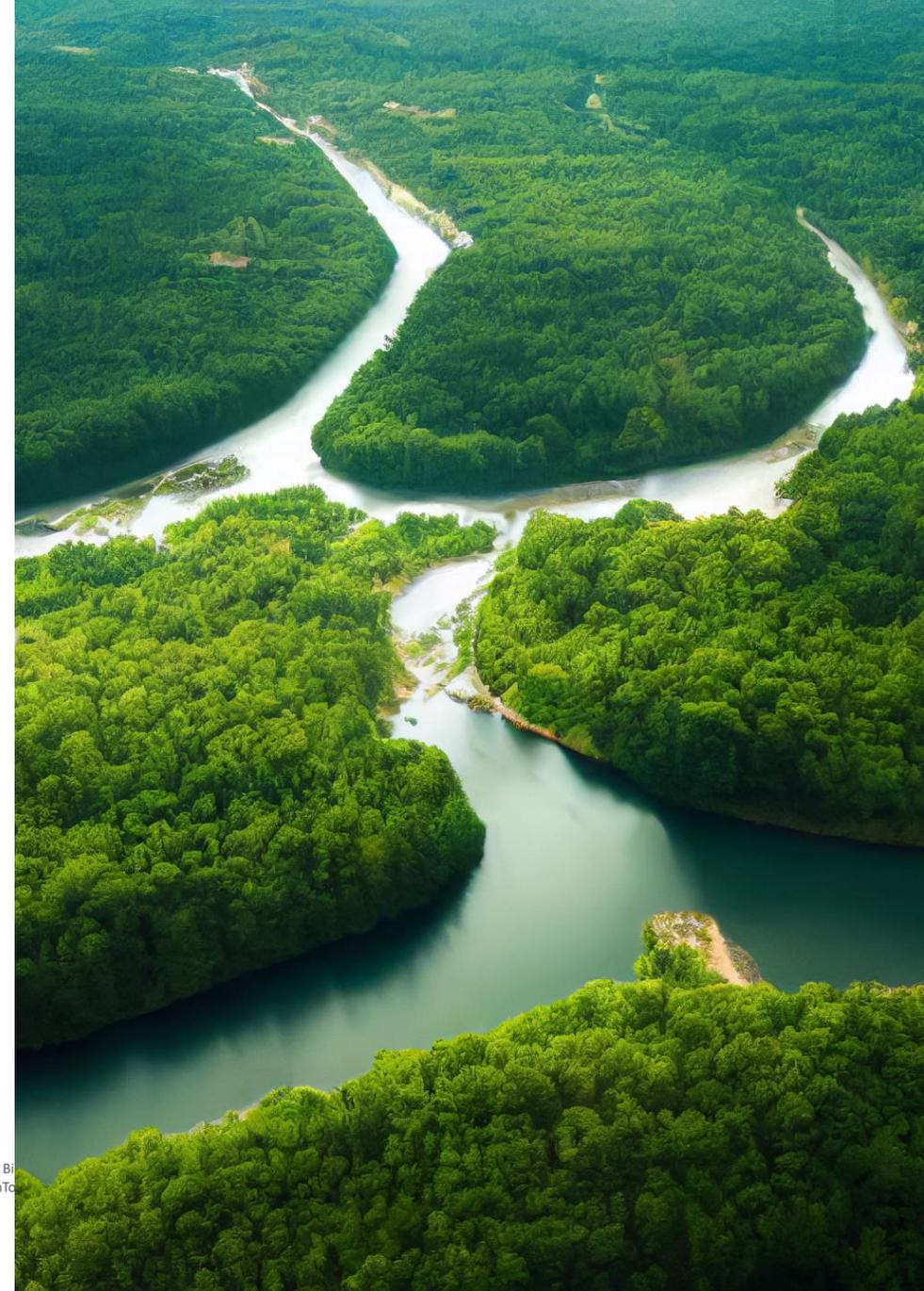
Costa Rica  
2,0



Bolivia  
3,9

Total  
USD 47  
millones  
anuales

Ingresos/Ahorros anuales  
derivados del aprovechamiento  
de metano en las PTAR  
seleccionadas  
(Millones de USD)



NACIONES UNIDAS  
CEPAL

División de Recursos Naturales



United Nations  
Peace and Development Trust Fund



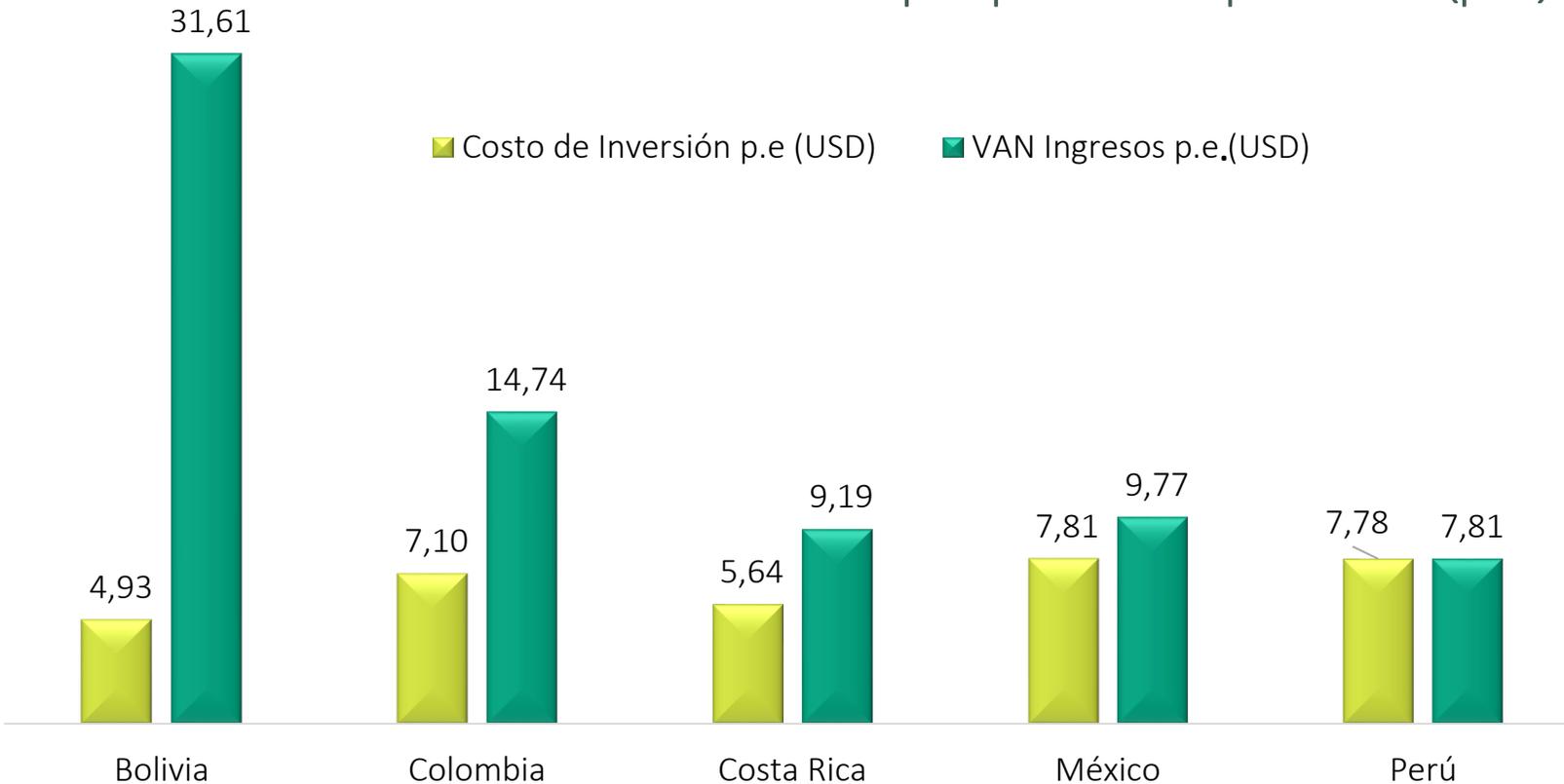
german  
cooperation  
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Con tecnología de Bing  
© GeoNames, Microsoft, OpenStreetMap, TomTom

# Evaluación Financiera: Costos de inversión vs. Ingresos proyectados a 20 años USD por persona equivalente (p.e.)



La estrecha viabilidad económica en Perú mejoraría con una mayor utilización de la capacidad instalada de las PTAR (aproximadamente el 50%).

El predominio de sistemas lagunares y sistemas anaerobios en Bolivia (con costos bajos de inversión) se traducen en una viabilidad financiera más holgada a la de los otros países.



# Beneficios derivados del aprovechamiento de metano

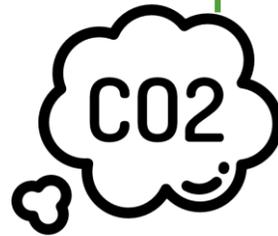
## Beneficios económicos

De una inversión estimada en USD 250 millones, se obtienen beneficios por USD 342 millones en 20 años



Relación  
Beneficio/Costo  
1,36

1,3 millones de  
toneladas/año



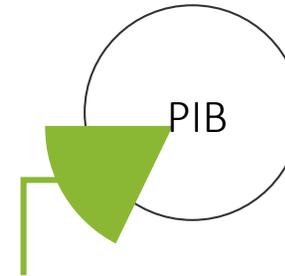
## Beneficios ambientales

Reducción de 1,3 millones de  
toneladas/año de CO2

## Beneficios

### macroeconómicos

El PIB de los 5 países se  
incrementaría en 1,3 dólares  
por cada dólar invertido



1,3 dolares por  
dolar invertido

38 empleos  
verdes por millón de  
dólares invertido



Beneficios  
*sociales*

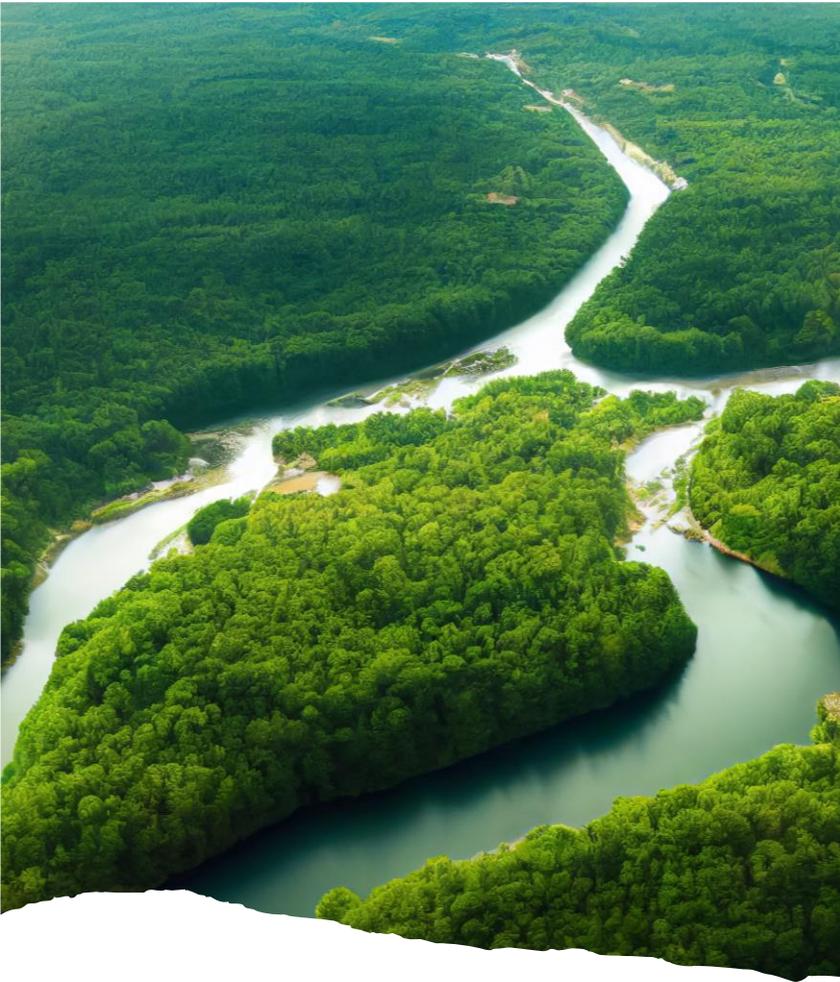


*¡Muchas Gracias!*





Economía circular en el sector de agua potable y saneamiento:  
Aprovechamiento de metano y eficiencia energética en municipios  
seleccionados de México



## Recuperación de nutrientes: Una opción de Economía Circular para el sector de agua potable y saneamiento

Antonio Santos Sánchez (PhD, Ing. Industrial)  
Consultor CEPAL – Unidad de Agua y Energía



NACIONES UNIDAS

CEPAL

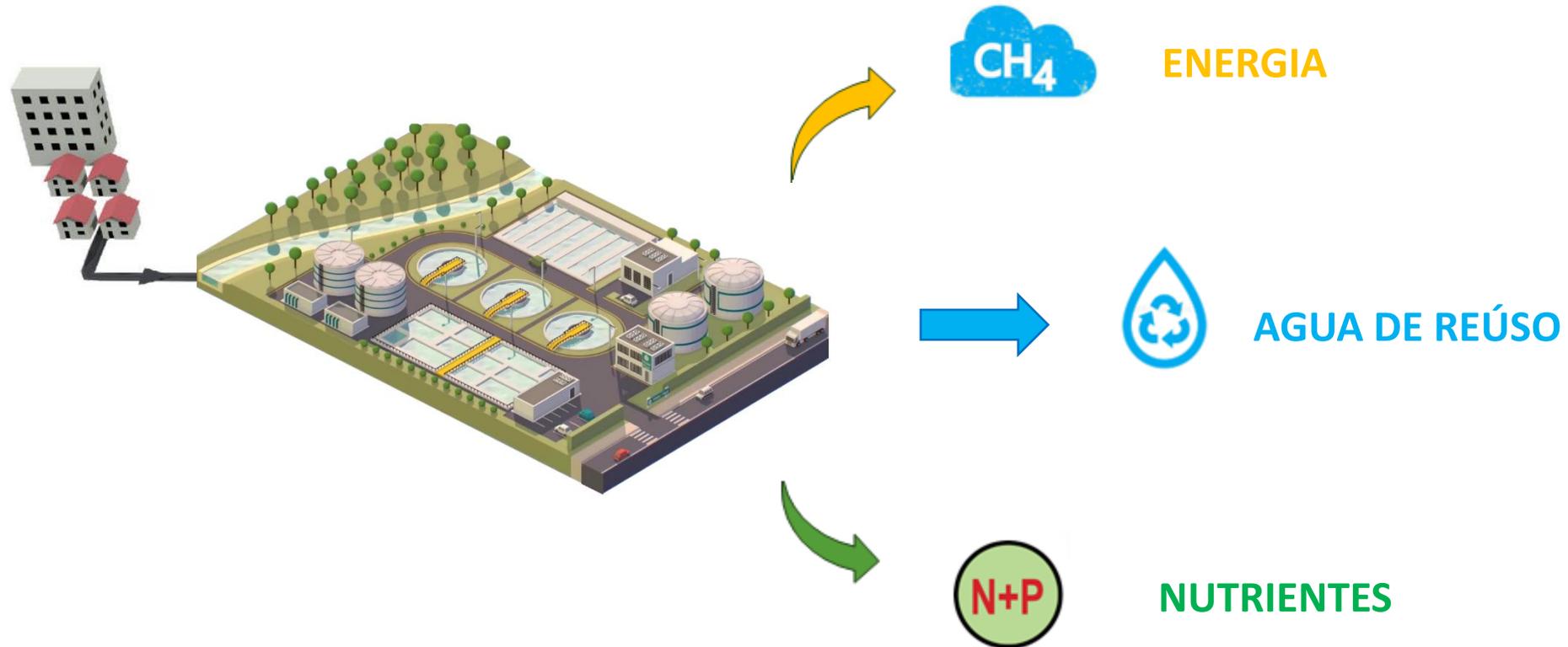
División de Recursos Naturales



United Nations  
Peace and Development Trust Fund



# Los nutrientes: otro recurso que puede ser recuperado en PTAR



# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Eutrofización / contaminación de acuíferos

# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Eutrofización / contaminación de acuíferos
- Normativa sobre valores límite de N y P cada vez más rigurosa

# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Eutrofización / contaminación de acuíferos
- Normativa sobre valores límite de N y P cada vez más rigurosa
- Tendencia de reúso de agua

# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Eutrofización / contaminación de acuíferos
- Normativa sobre valores límite de N y P cada vez más rigurosa
- Tendencia de reúso de agua
- Permite producir fertilizantes localmente, de forma **renovable** y reduciendo la **dependencia** de importaciones.

# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Eutrofización / contaminación de acuíferos
- Normativa sobre valores límite de N y P cada vez más rigurosa
- Tendencia de reúso de agua
- Permite producir fertilizantes localmente, de forma **renovable** y reduciendo la **dependencia** de importaciones.

Normativa alemana: obliga a recuperar P de los lodos de plantas de municipios > 50.000 p-eq

# ¿Por qué recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

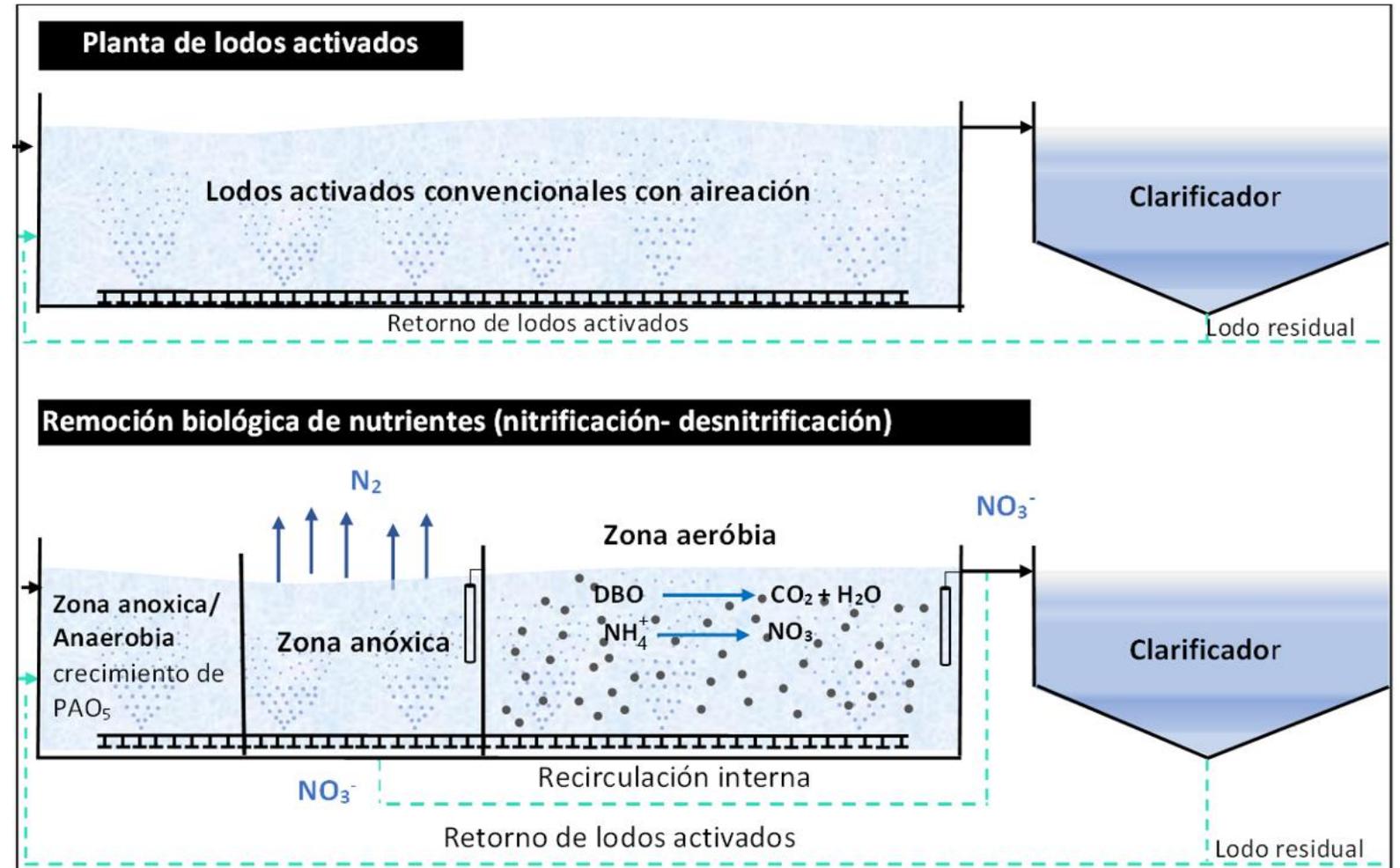
- Eutrofización / contaminación de acuíferos
- Normativa sobre valores límite de N y P cada vez más rigurosa
- Tendencia de reúso de agua
- Permite producir fertilizantes localmente, de forma **renovable** y reduciendo la **dependencia** de importaciones.
- Reducción de costes de operación en las PTAR

**¿Cómo recuperar los nutrientes de las aguas residuales?**

# REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN PROCESOS DE TRATAMIENTO

## Proceso de remoción biológica de nutrientes (RBN) con sistema de Lodos Activados

- **Transformación de nitrógeno orgánico y amoniacal (Aprox. 60%)** en gas nitrógeno que se libera a la atm.
- **PAOs:** acumulan fósforo, eliminación parcial del agua (**aprox. 67%**) y pasando al lodo.
- **Para lograr concentración baja de P:** es necesario adicionar un poco de remoción química (Al, Fe) tras la RBN.



PAO: Organismos acumuladores de polifosfato

$NO_3^-$ : Nitratos

# ¿Cómo recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Cuando las PTAR usan remoción biológica de P, éste se acumula en los lodos activados, que son encaminados para digestión anaeróbica.
- Los lodos secos (biosólidos) contienen N y P ... pero también cantidades desconocidas de metales, microplásticos, y otros contaminantes emergentes.



La incineración puede eliminar gran parte de estos contaminantes

# ¿Cómo recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

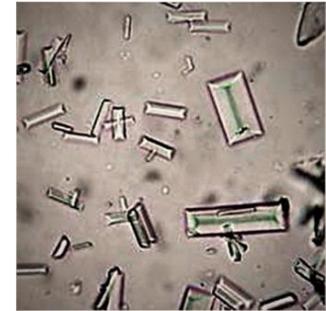
- Cuando las PTAR usan remoción biológica de P, éste se acumula en los lodos activados, que son encaminados para digestión anaeróbica.
- Los lodos secos (biosólidos) contienen N y P ... pero también cantidades desconocidas de metales, microplásticos, y otros contaminantes emergentes.
- Hay varias tecnologías para recuperar N y P a partir de digestato y licores de deshidratación de lodos (centrado).  
Inclusive se están desarrollando tecnologías para recuperar N y P a partir de las cenizas de lodos (la incineración de lodos es tendencia en Europa).

# ¿Cómo recuperar los nutrientes de las aguas residuales?

- Cuando las PTAR usan remoción biológica de P, éste se acumula en los lodos activados, que son encaminados para digestión anaeróbica.
- Los lodos secos (biosólidos) contienen N y P ... pero también cantidades desconocidas de metales, microplásticos, y otros contaminantes emergentes.
- Hay varias tecnologías para recuperar N y P a partir de digestato y licores de deshidratación de lodos (centrado).  
Inclusive se están desarrollando tecnologías para recuperar N y P a partir de las cenizas de lodos (la incineración de lodos es tendencia en Europa).
- La principal de estas tecnologías es la precipitación de N y P en la forma de estruvita.

# Precipitación química de estruvita

- La precipitación de cristales de estruvita ocurre de forma natural a  $\text{pH} > 7$  y concentración de  $\text{PO}_4^{3-} > 50 \text{ mg/L}$ . Típicamente: entre la salida del biodigestor y las centrífugas de deshidratación de lodo



La precipitación depende del ion limitante (que es el  $\text{Mg}^{2+}$ ). pH óptimo entre 7,6-8,1

# Precipitación controlada de estruvita en un reactor de flujo ascendente

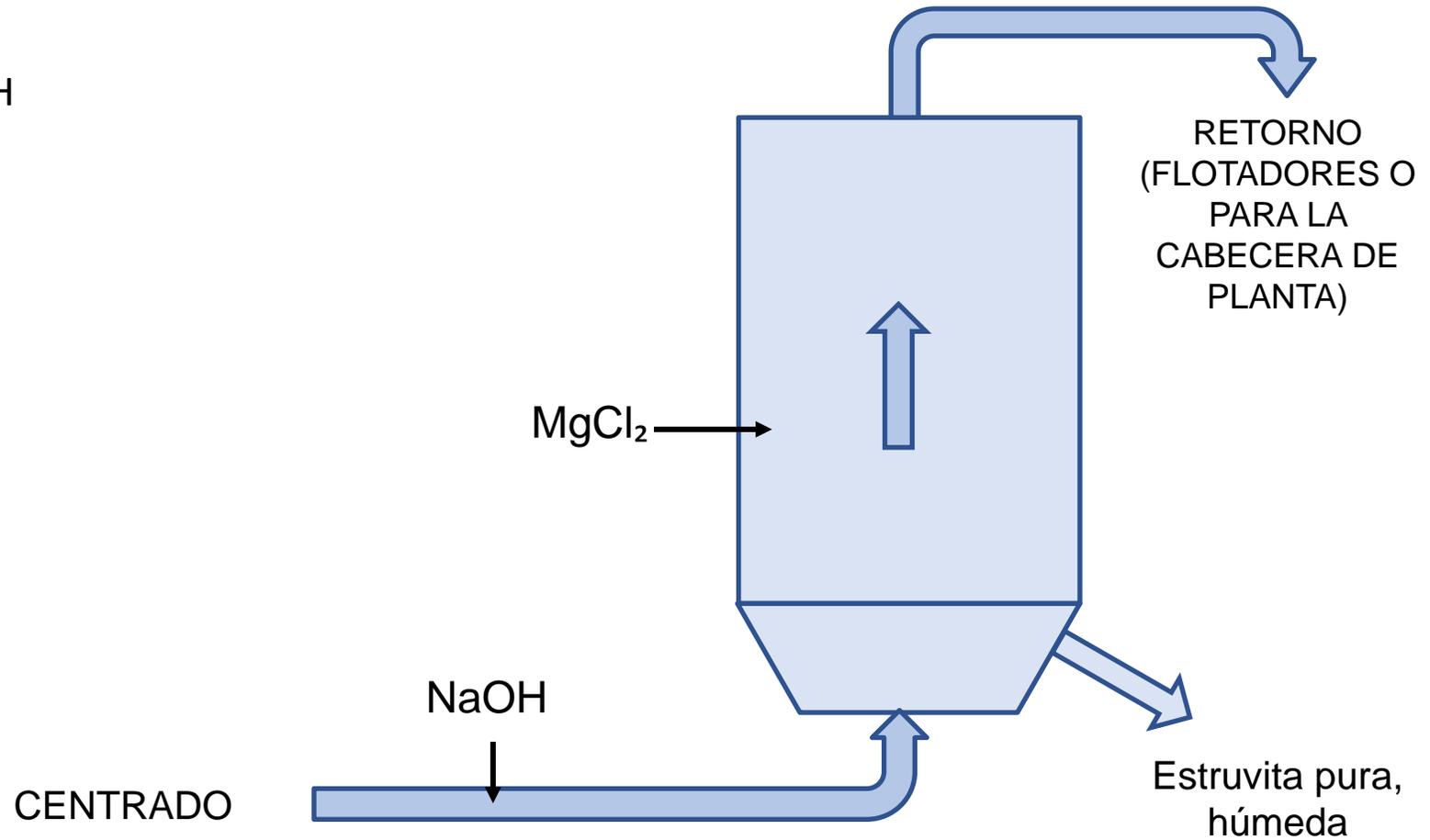
1º. Elevar pH

2º. Añadir  $\text{Mg}^{2+}$

# Precipitación controlada de estruvita en un reactor de flujo ascendente

1º. Elevar pH ↗ Añadiendo NaOH

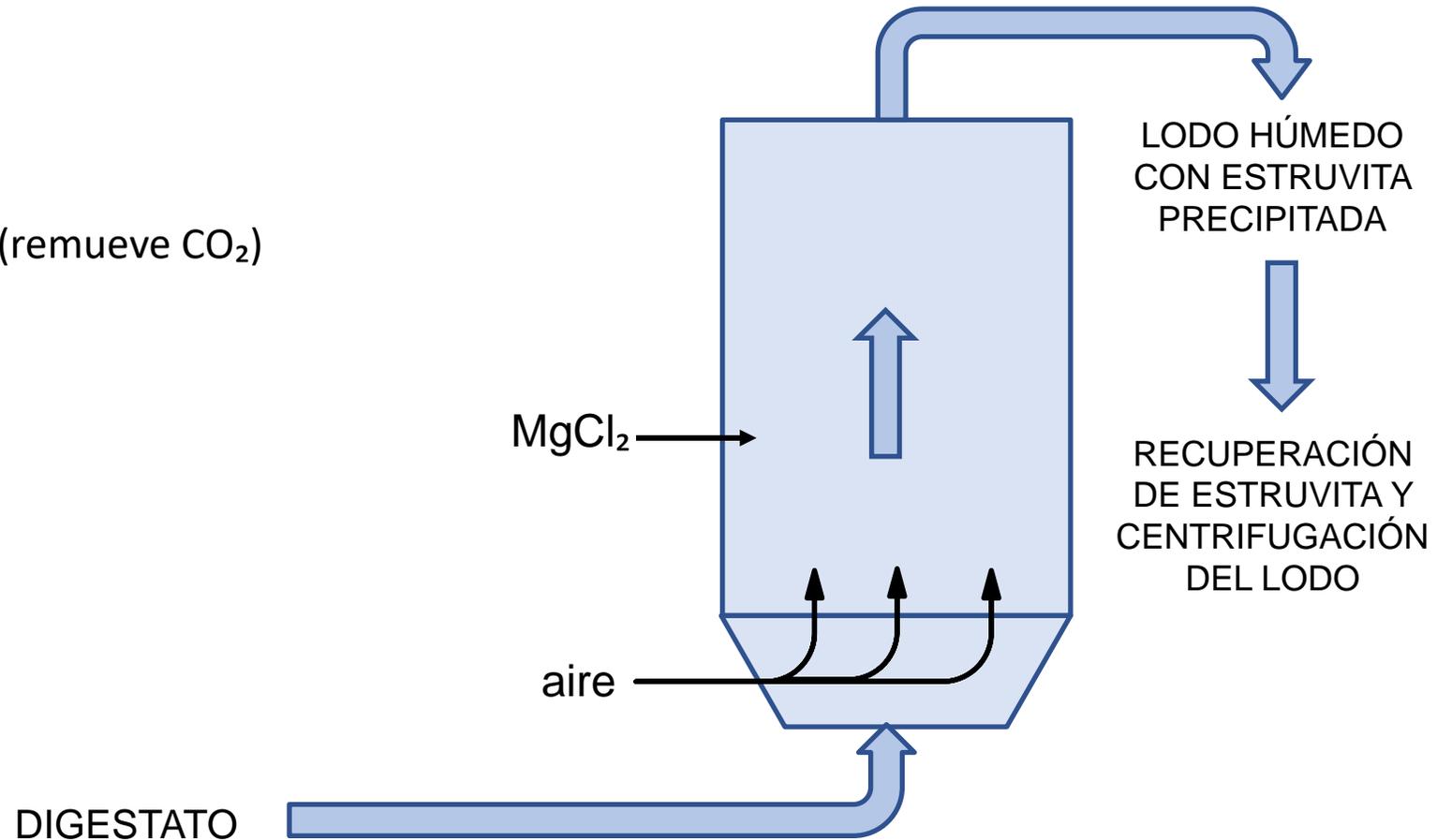
2º. Añadir  $Mg^{2+}$

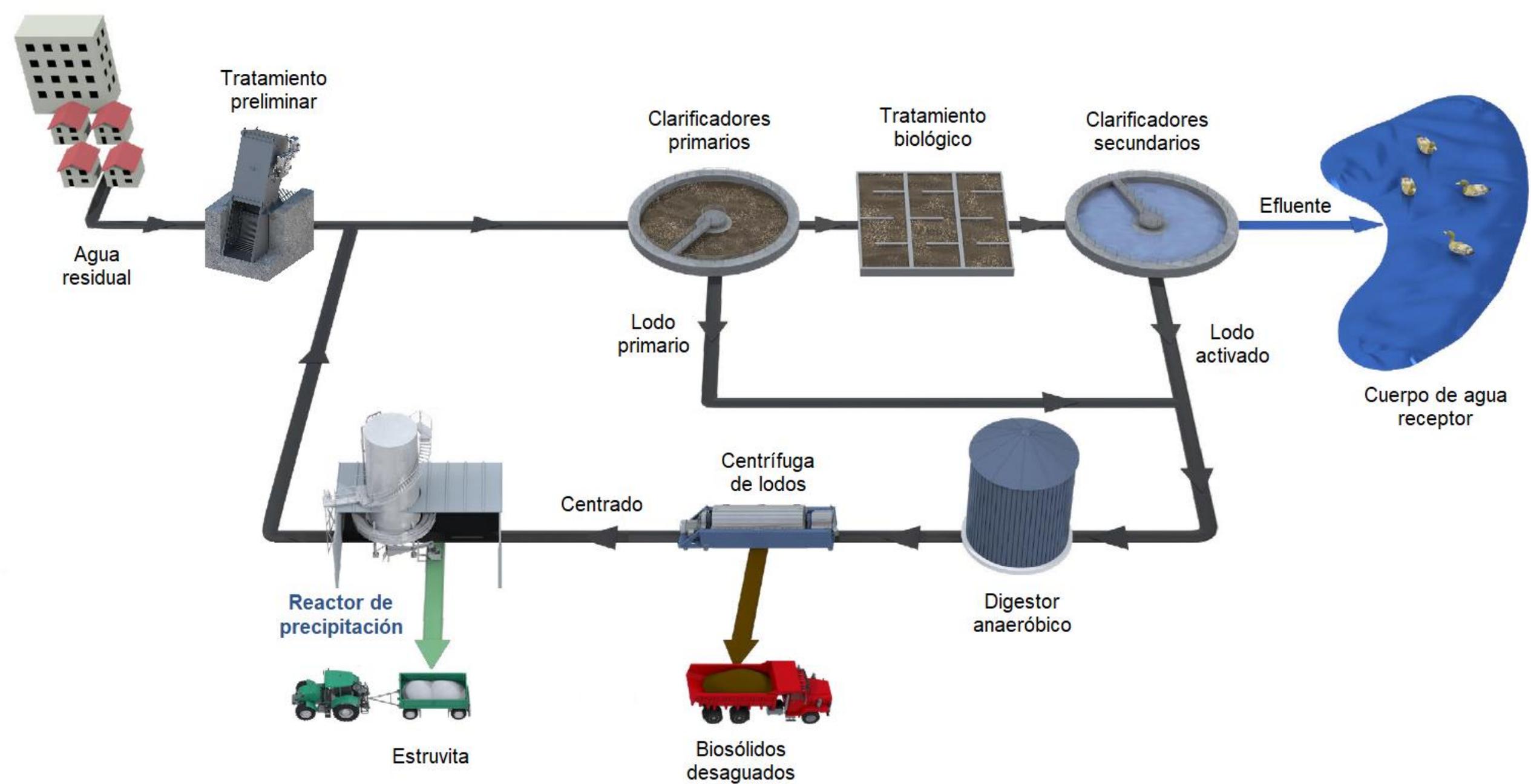


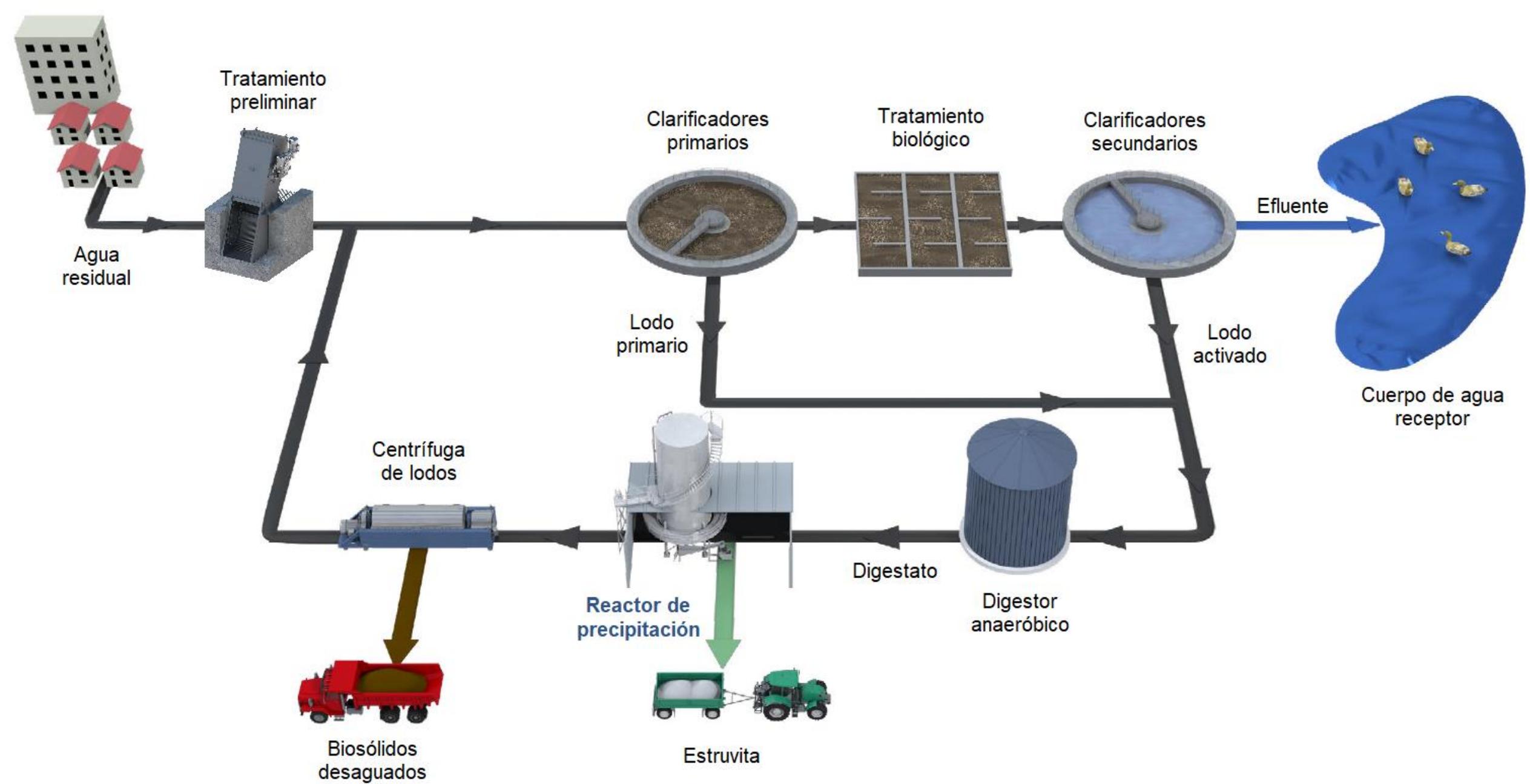
# Precipitación controlada de estruvita en un reactor de flujo ascendente

- 1º. Elevar pH
- Añadiendo NaOH
  - Stripping* con aire (remueve CO<sub>2</sub>)

2º. Añadir Mg<sup>2+</sup>







# Reactor de precipitación de estruvita: beneficios en la operación de la planta

1. Eliminación de la precipitación indeseada de estruvita (incrustaciones entre el biodigestor y las centrífugas)



# Reactor de precipitación de estruvita: beneficios en la operación de la planta

2. Si se precipita la estruvita usando **digestato**,  
se mejora la posterior deshidratación del lodo en las centrífugas

- ✓ Aumenta la sequedad de lodos deshidratados (+4%)

# Reactor de precipitación de estruvita: beneficios en la operación de la planta

2. Si se precipita la estruvita usando **digestato**,  
se mejora la posterior deshidratación del lodo en las centrífugas

- ✓ Aumenta la sequedad de lodos deshidratados (+4%)
- ✓ Se reduce el consumo de cloruro férrico y de polímeros para espesar los lodos (en 10-15%)

(La presencia de P otorga mayor consistencia al lodo.

Al remover P del lodo, éste queda menos cohesionado y se mejora su deshidratación)

# Reactor de precipitación de estruvita: beneficios en la operación de la planta

2. Si se precipita la estruvita usando **digestato**,  
se mejora la posterior deshidratación del lodo en las centrífugas

- ✓ Aumenta la sequedad de lodos deshidratados (+4%)
- ✓ Se reduce el consumo de cloruro férrico y de polímeros para espesar los lodos (en 10-15%)

PLANTAS EN ALEMANIA Y HOLANDA HAN RELATADO BENEFICIOS ECONÓMICOS SIGNIFICATIVOS

GRACIAS A LA MEJORA EN LA OPERACIÓN DE LA PLANTA

**70%** por la reducción en el consumo de polímeros /  $\text{FeCl}_3$

**20%** por evitar las incrustaciones de estruvita

**10%** por la venta del fertilizante producido

# Reactor de precipitación de estruvita: beneficios en la operación de la planta

PTAR	Inauguración – planta de estruvita	CAPEX – planta de estruvita	Resultados	Economía por año en los costes de operación de la PTAR
Mönchengladbach (Alemania) 800.000 p-eq	2009	2.550.000 USD	95% remoción P Eliminación de incrustaciones indeseadas y del uso de FeCl <sub>3</sub> Torta de lodo con +4% de sólidos	850.000 USD/año
Amsterdam (Holanda) 1.700.000 p-eq	2014	2.466.000 USD	95% remoción P 20% menos de consumo de polímero Torta de lodo con +4% de sólidos	550.000 USD/año

PLANTAS EN ALEMANIA Y HOLANDA HAN RELATADO BENEFICIOS ECONÓMICOS SIGNIFICATIVOS

GRACIAS A LA MEJORA EN LA OPERACIÓN DE LA PLANTA

**70%** por la reducción en el consumo de polímeros / FeCl<sub>3</sub>

**20%** por evitar las incrustaciones de estruvita

**10%** por la venta del fertilizante producido

# Características de la estruvita como fertilizante

Estruvita precipitada



5%N - 28%P - 0%K

+10% Mg

MAP  
(Fosfato monoamónico)



12%N - 60%P - 0%K

DAP  
(Fosfato diamónico)



18%N - 46%P - 0%K

# Características de la estruvita como fertilizante

Estruvita precipitada



5%N - 28%P - 0%K

+10% Mg

4% solubilidad en agua  
96% solubilidad en citrato

Índice salino 7.7

MAP  
(Fosfato monoamónico)



12%N - 60%P - 0%K

90% solubilidad en agua  
10% solubilidad en citrato

Índice salino 27.0

DAP  
(Fosfato diamónico)



18%N - 46%P - 0%K

93% solubilidad en agua  
7% solubilidad en citrato

Índice salino 29.0

# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur



2.937.600 p-eq

Caudal medio diario: 2,82 m<sup>3</sup>/s

Recibe lodos de otras dos PDAR

Producción de biosólidos secos: 203 t/día

Valores a la entrada:  $\left\{ \begin{array}{l} N = 76,6 \text{ mg/L} \\ P = 9,5 \text{ mg/L} \end{array} \right.$

Valores límite a la salida muy rigurosos debido al buen estado del río receptor.  $\left\{ \begin{array}{l} N = 7,95 \text{ mg/L} \\ P = 0,24 \text{ mg/L} \end{array} \right.$   
(Parque Natural)

Esta PTAR no estaba preparada para una remoción de nutrientes tan alta.

# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur

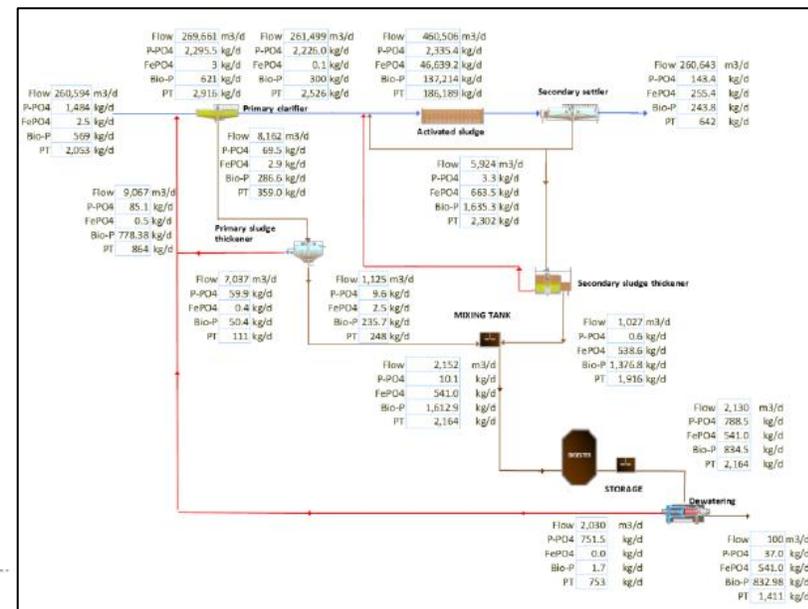
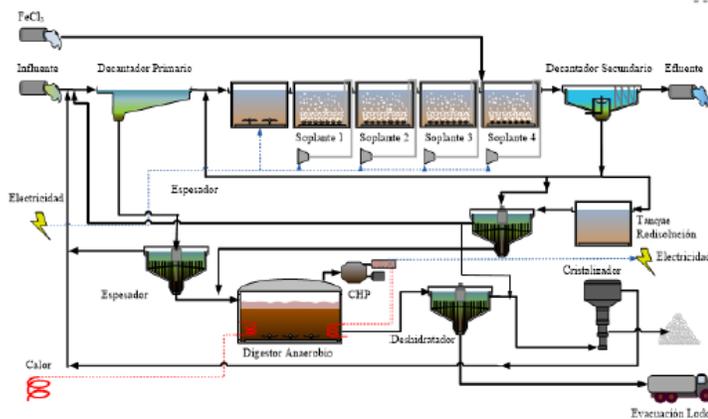
Como paso previo, se realizó un modelo (**gemelo digital**) para simular el efecto de colocar el precipitador



PTAR



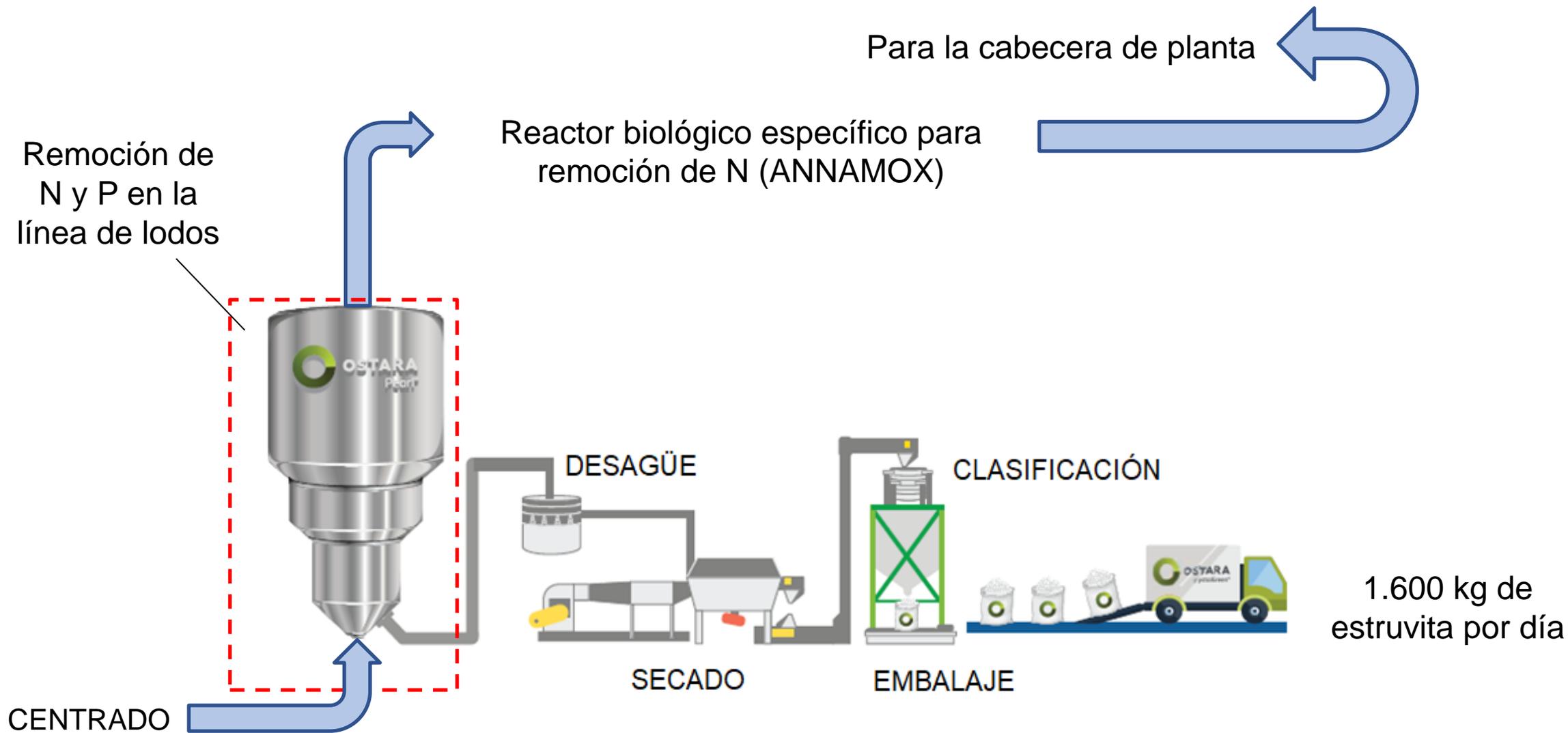
Modelo en WEST



Simulación

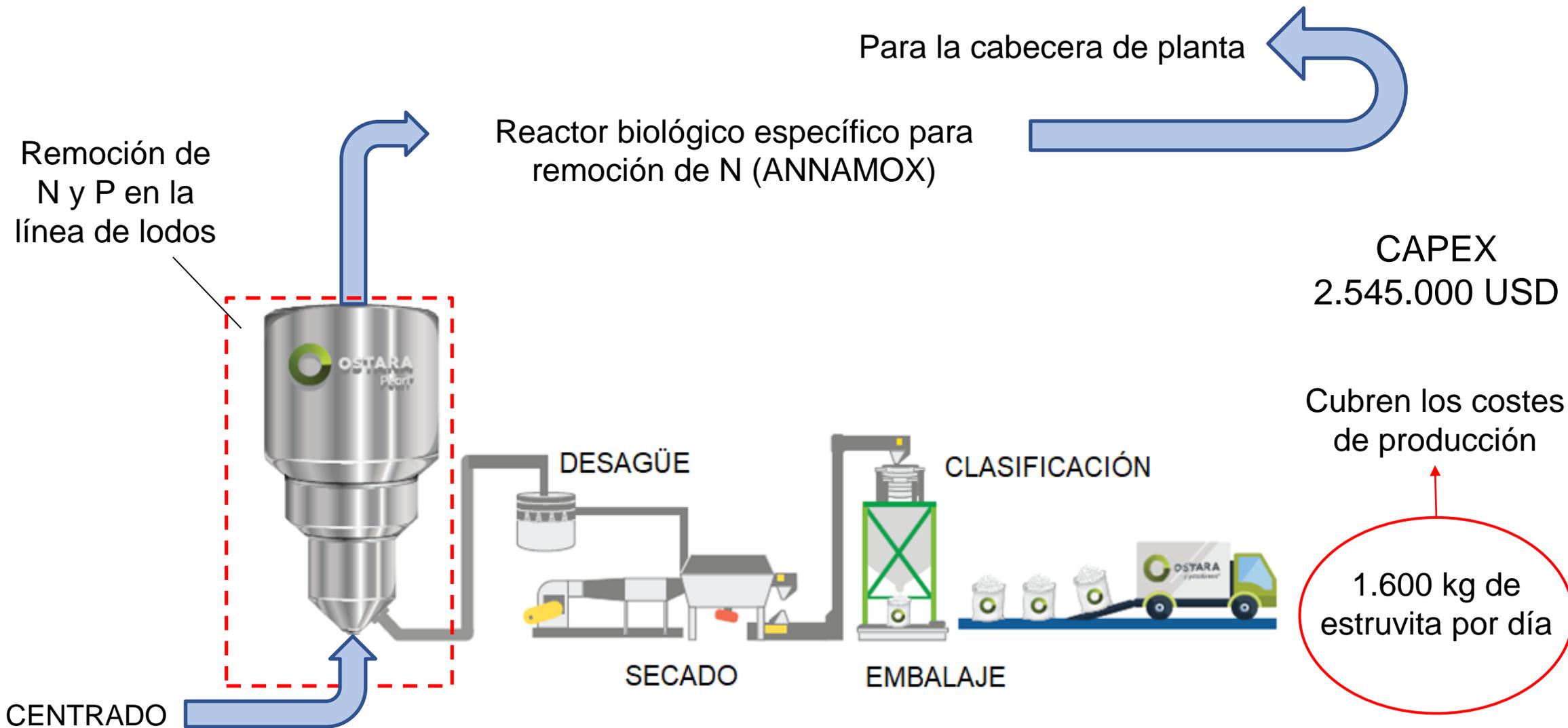


# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur



Planta de estruvita - inauguración 2017

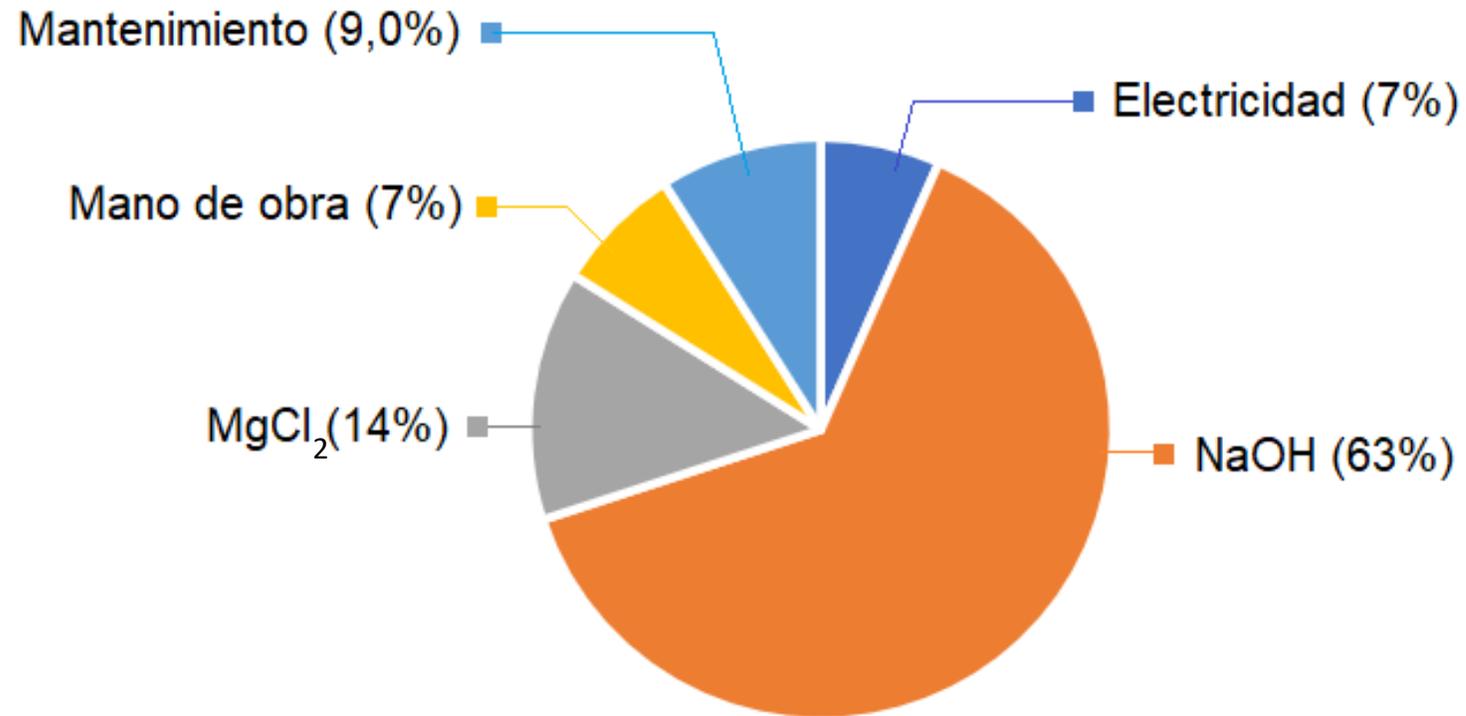
# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur



Planta de estruvita - inauguración 2017

# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur

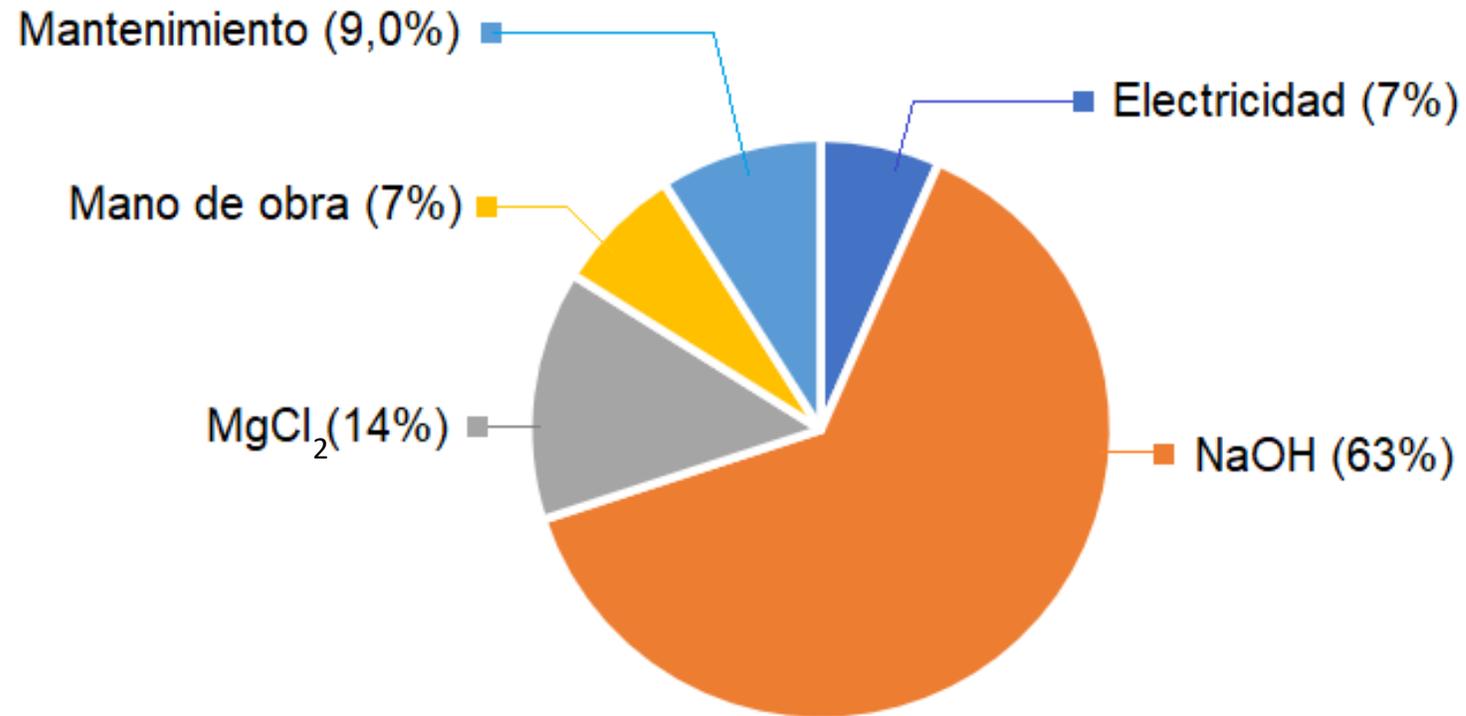
## Costes de operación - planta de estruvita



Para precipitar 1kg de estruvita se usan: 1 kWh; 0,75 kg NaOH; 0,13 kg MgCl

# Planta de tratamiento de aguas residuales de Madrid Sur

## Costes de operación - planta de estruvita



VEAMOS LA PLANTA EN FUNCIONAMIENTO:

[https://www.youtube.com/watch?v=Xg3NjIZ2N-k&ab\\_channel=Canaldelsabelll](https://www.youtube.com/watch?v=Xg3NjIZ2N-k&ab_channel=Canaldelsabelll)

## Algunos enlaces de interés:

European Sustainable Phosphorous Platform

<https://www.phosphorusplatform.eu/>

Proyecto Phos4You

<https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/phos4you-phosphorus-recovery-from-waste-water-for-your-life/>

Sistemas comerciales de precipitación de estruvita

<http://lp.evoqua.com/nutrient-recovery-2022.html>

<http://www.nuresys.com/index.html>

<https://cnp-cycles.de/en/processes/airprexr-p-recovery-process>

<https://www.centrisys-cnp.com/calprex>

<https://www.centrisys-cnp.com/magprex>

<https://https://www.centrisys-cnp.com/calprex-magprex>

<https://www.veoliawatertechnologies.com/en/products/struvia>

Formulario para analizar la viabilidad de un sistema de recuperación de nutrientes en su PTAR

<https://forms.gle/KkS8fcAcFpXjWP5W7>

# *¡Muchas Gracias!*



División de Recursos Naturales



United Nations  
Peace and Development Trust Fund



Antonio Santos Sánchez  
sanchez.ufop@gmail.com