

**EL REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO COMO  
PRODUCTOR DE ESTRUVITA**

**THE FLUIDIZED BED REACTOR AS A  
PRODUCER OF STRUVITE**

MÁSTER EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Presentado por:**

**LUIS LOZANO DÍAZ**

**Dirigido por:**

**PEDRO LETÓN GARCÍA**

Madrid, Mayo de 2020

Edición 2019-2020



## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia, por que ellos son la motivación de mi vida, mi orgullo de ser lo que soy. Gracias a todos ellos por confiar siempre en mí.*

**INDICE**

INDICE DE TABLAS .....	3
INDICE DE FIGURAS.....	4
INDICE DE REACCIONES .....	5
ACRÓNIMOS.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	7
PALABRAS CLAVE .....	7
KEY WORDS.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVO.....	11
3. METODOLOGÍA.....	11
3. RESULTADOS .....	12
3.1. FÓSFORO EN LAS EDAR.....	12
3.1.1. FÓSFORO EN EL AGUA RESIDUAL.....	12
3.1.2. MARCO NORMATIVO.....	13
3.1.3. REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN LAS EDAR.....	13
3.2. ESTRUVITA – CRYSTALGREEN .....	21
3.2.1. MARCO NORMATIVO.....	23
3.2.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	24
3.3. REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO .....	25
3.3.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN .....	26
3.3.2. COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN .....	27
3.3.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	37
3.3.4. COMPARATIVA DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS .....	39
3.4. ANÁLISIS DE VIABILIDAD .....	41

3.4.1.	COSTES DE INVERSIÓN INICIAL.....	41
3.4.2.	COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	42
3.4.3.	INGRESOS DE PLANTA .....	43
3.4.4.	ESTUDIO DE VIABILIDAD .....	44
3.	DISCUSIÓN.....	46
4.	CONCLUSIONES.....	47
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	48

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Concentraciones límites de Fósforo y Nitrógeno en el efluente. La Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.....	13
Tabla 2. Composición típica de la media de valores del año 2019 de los sobrenadantes de espesamiento por flotación. Datos Analíticos de Canal de Isabel II, S.A .....	18
Tabla 3. Composición típica de la media de valores del año 2019 de los reboses de espesamiento por centrifugación. Datos Analíticos de Canal de Isabel II, S.A.....	21
Tabla 4. Composición de estruvita. Fuente: elaboración propia [10].....	22
Tabla 5. Composición típica de la media de valores del año 2019 del efluente de un reactor PEARL 2000. Datos Analíticos de Canal de Isabel II, S.A.....	33
Tabla 6. Aumento y reducción de los componentes típicos del sobrenadante de centrifugación tras el proceso de precipitación de estruvita. Datos Analíticos de Canal de Isabel II, S.A.....	33
Tabla 7. Capacidad de reducir fósforo en distintos reactores. Fuente: elaboración propia a partir de datos [12] .....	40
Tabla 8. Costes de la fase de construcción de planta productora de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos de [2] y [11].....	41
Tabla 9. Representación del Coste Anual Equivalente y Coste Financiero de la instalación de una planta de producción de estruvita. Fuente: elaboración propia .....	44
Tabla 10. Balance de gastos frente a beneficios y tiempo de amortización. Fuente: elaboración propia.....	44

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Ciclo natural del fósforo. Fuente: elaboración propia.....	9
Figura 2. Precipitación de estruvita en conducción. Fuente: web hrs-heatexchangers.com.....	10
Figura 3. Eutrofización de ecosistema. Fuente: web cotidiano.com .....	10
Figura 4. Diagrama de Flujo de Infraestructuras de una EDAR Convencional donde se Produce la Eliminación de Fósforo. Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 5. Esquema del metabolismo de las bacterias PAO. Fuente web tecpa.es. ....	16
Figura 6. Variación de los distintos componentes presentes en el licor mezcla. Fuente web tecpa.es.....	16
Figura 7. Cristales ortorrómbicos. Fuente: historiasveterinarias.wordpress.com ...	22
Figura 8. Diagrama de Flujo de una Planta Tipo Productora de CrystalGreen Fuente: elaboración propia .....	25
Figura 9. Electrobombas sumergibles y depósitos. Fuente: elaboración propia ....	28
Figura 10. Depósitos de NaOH y MgCl <sub>2</sub> . Fuente: elaboración propia .....	29
Figura 11. Reactor. Fuente: elaboración propia .....	32
Figura 12. Superficie del reactor. Fuente: elaboración propia.....	32
Figura 13. Comparación entre la concentración de componentes de entrada y la de salida en un reactor Pearl 2000. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 14. Tamiz vibrante. Fuente: elaboración propia.....	35
Figura 15. Sistema de deshidratación. Fuente: elaboración propia.....	36
Figura 16. Tamiz clasificador. Fuente: elaboración propia .....	37
Figura 17. Silos de almacenamiento. Fuente: elaboración propia .....	37
Figura 18. CrystalGreen. Fuente: elaboración propia .....	40

**INDICE DE REACCIONES**

Reacción 1. Precipitación de sal de fosfato. Fuente: web quotidiano.com .....	14
Reacción 2. Proceso de hidrólisis. Fuente: elaboración Propia .....	19
Reacción 3. Proceso de Fermentación. Fuente: elaboración propia .....	19
Reacción 4. Proceso de acetogénesis. Fuente: elaboración propia .....	19
Reacción 5. Proceso de metanogénesis. Fuente: elaboración propia .....	19
Reacción 6. Precipitación de CrystalGreen o Estruvita. Fuente: elaboración propia .....	22
Reacción 7. Síntesis de bicarbonato magnésico. Fuente: elaboración propia .....	30
Reacción 8. Precipitación de CrystalGreen o Estruvita. Fuente: elaboración propia .....	30



**ACRÓNIMOS**

EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
PAO	Organismos acumuladores de Poli-fosfatos
Me <sup>+3</sup>	Sal metálica
GAO	Organismos acumuladores de glucógeno
PHV	Poli-β-hidroxivalerato
PHB	Poli-β-hidroxibutirato
SSLM	Sólidos en suspensión en el licor mezcla
RPM	Revoluciones por minuto
APQ	Almacenamiento de productos químicos
JRC	Joint Research Centre
SCADA	Supervisión, control y adquisición de datos
°C	Grados centígrados
Kg	Kilogramos
kWh	Kilovatios hora
PLC	Controlador lógico programable
T	Tonelada

## **RESUMEN**

En el siguiente trabajo, resultado de un análisis bibliográfico y del análisis del estado del arte, se expone una tecnología innovadora, utilizada por las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (en adelante EDAR) para la obtención de un fertilizante de alta calidad a partir de los residuos generados.

Se ha realizado el estudio de la eliminación de fósforo, por vía biológica y físico-química, en las EDAR, así como el de características, procedimiento, ventajas e inconvenientes y viabilidad de la instalación de un reactor de lecho fluidizado de flujo ascendente y del producto generado en forma de fertilizante.

Junto con la información bibliográfica, en la realización de este trabajo se ha prestado especial atención al reactor de lecho fluidizado modelo Pearl 2000 que Canal de Isabel II, S.A. está actualmente incorporando en las EDAR que gestiona.

## **ABSTRACT**

The following research presents the results of a bibliographic analysis along with the analysis of the state of the art. The study performed incorporates a series of innovative technologies used by Wastewater Treatment Plants (WWTP) to obtain high-quality bioproducts from the waste generated.

The study analyzed phosphorus removal using biological and physical-chemical methods in the WWTP. In addition, the research incorporates the analysis of the fluidized bed reactor's features, the procedure used, the advantages and disadvantages of this reactor, the viability of its installation and the product generated like fertilizer.

Along with the bibliographic information obtained in this study, there has been special attention paid to the technologies, such as fluidized bed reactor model Pearl 2000, that Canal de Isabel II, S.A. is currently incorporating into the technologies that WWTPs manages.

## **PALABRAS CLAVE**

Fertilizante, EDAR, fósforo, economía circular, lecho fluidizado, estruvita.

## KEY WORDS

Fertilizer, WWTP, phosphorus, circular economy, fluidized bed, struvite.

## 1. INTRODUCCIÓN

Naciones Unidas estima que el en año 2050 existirán 9.700 millones de habitantes en la tierra [1], esto se representa en un aumento del 26% de la población actual. Este aumento poblacional motiva una gran demanda de alimentos y recursos, obligando a incrementar la productividad de los distintos sectores. El sector agrícola se ve obligado a aumentar la utilización de fertilizantes con el objetivo de facilitar el crecimiento de las plantas, el aumento de las floraciones, el aumento en la producción de semillas y la resistencia frente a enfermedades entre otras.

Actualmente la mayoría de los fertilizantes minerales que se aplican en la agricultura se componen, entre otros nutrientes, de fósforo (en adelante P). El fósforo es un macronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, que se encuentra en la naturaleza en forma de roca fosfatada  $PO_4^{3-}$ , formando reservas finitas accesibles de rocas fosfatadas e inaccesibles en forma de sedimentos oceánicos. Aproximadamente el 70% de estas reservas accesibles, se encuentran en Marruecos y en el Sahara Occidental [2], dotándolas de un carácter estratégico y esencial.

Se conoce que alrededor de un 80% del fósforo extraído de estas reservas se destina a la síntesis de fertilizantes destinados al sector agrícola. Dicha extracción es mayor que la tasa de reposición natural, por lo cual se estima en un periodo de 200 años el agotamiento definitivo de dichas reservas. [2]

El ciclo natural del P comienza en forma de fosfatos en los océanos, donde sedimenta por gravedad o se localiza en el interior de los seres vivos marinos que lo ingieren, formando rocas fosfatadas en los fondos oceánicos. El P marino puede aflorar en la superficie por acción de movimientos orogénicos o por la deposición en forma de guano de los seres vivos que se alimentan de otros

marinos. En la superficie terrestre, las plantas lo adsorben a través del proceso de meteorización transmitiéndose a los seres vivos terrestres al ser ingeridas. Tras la muerte de los mismos el fósforo se transfiere de nuevo a la superficie terrestre en forma de ortofosfatos. A través de la escorrentía el P que se acumula en la superficie terrestre se transporta hacia los ríos para su posterior desembocadura en los océanos. Con el aumento demográfico se incrementan los núcleos de población y por tanto las actividades que en ellos se realizan, como pueden ser la deforestación o la agricultura. Las cuales incrementan la retención de P en su ciclo natural, aumentando la aportación a las reservas inaccesibles oceánicas [3].

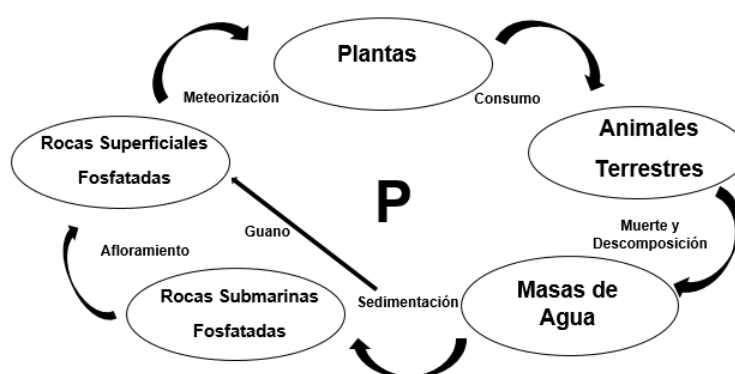


Figura 1. Ciclo natural del fósforo. Fuente: elaboración propia.

En la actualidad existen distintas tecnologías que permiten recuperar el fósforo de manera artificial, como por ejemplo en forma de harina de huesos o compost. Aun así, se comprueba que no se recupera la suficiente cantidad como para paliar la gran demanda del sector agrícola, es por ello que se genera la búsqueda de nuevas alternativas. Lo primero que se piensa a la hora de buscar estas, es la presencia del macronutriente y por ello se observa una gran concentración disponible y accesible en el agua residual urbana. Se siguen las estrategias en boga de la economía circular, por la que se obtienen productos a partir de desechos y se reducen los consumos de materias primas, agua y energía. El resultado es un conjunto de distintas tecnologías que producen un fertilizante denominado estruvita o CrystalGreen compuesto por fosfato, amonio y magnesio.

Actualmente dicho fertilizante se está comercializando generándose una gran aceptación entre los agricultores, pudiéndose alcanzar valores de mercado de hasta 1000\$ por tonelada de fertilizante. La principal ventaja por la que se

distingue este fertilizante de otro tipo de fertilizantes es por su gran dureza y baja solubilidad, lo cual le caracteriza de una liberación lenta de componentes con todas las ventajas que conlleva.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de la economía circular es obtener recursos a partir de residuos, en este caso particular parece que el reactor de lecho fluidizado es un buen sistema para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de la sal estruvita, generando este fertilizante a partir de los reboses producidos por el espesamiento de fangos por flotación y la deshidratación de fangos por centrifugación. De los cuales obtiene el fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  y amonio  $\text{NH}_4^+$  que se requiere para la precipitación en forma de fertilizante [4].

Además de obtener este producto, el reactor de lecho fluidizado consigue eliminar la concentración de macronutrientes, nitrógeno y fósforo, en los efluentes que se generan en las EDAR. La reducción de estas concentraciones impide que se originen procesos como el de la precipitación incontrolada de estruvita sobre las instalaciones y equipos que conforman la EDAR, las cuales pueden suponer costes de mantenimiento de hasta 90.000 € anuales, además de la interrupción del proceso de depuración.

El proceso de eutrofización de ecosistemas también se reduce con la instalación de esta tecnología. En dicho proceso se origina la alteración o incluso muerte total de los ecosistemas receptores de efluentes de EDAR. Debido a las altas concentraciones de macronutrientes que se emiten por posibles fallos en la depuración o por la incapacidad de tratamiento del influente que se recibe.



**Figura 2. Precipitación de estruvita en conducción. Fuente: web hrs-heatechangers.com**



**Figura 3. Eutrofización de ecosistema. Fuente: web quotidiano.com**

## **2. OBJETIVO**

Se ha establecido como objetivo del presente trabajo de fin de máster, el estudio pormenorizado de un sistema de producción de fertilizante en funcionamiento, en el que se utiliza un lecho fluidizado y se analizan sus características técnicas y modo de operación, así como su viabilidad económica.

Para ello se ha realizado una búsqueda bibliográfica con el fin de establecer un estado del arte en la recuperación de nutrientes de las aguas residuales, poniendo especial disposición en la utilización de lechos fluidizados como reactor más adecuado para esta recuperación.

## **3. METODOLOGÍA**

Para la realización de este trabajo de fin de máster, se ha aportado los conocimientos e ideas propias que se tienen no solo de esta tecnología, si no del sistema de depuración en general.

Se han establecido las ventajas e inconvenientes que supone la instalación de un reactor de lecho fluidizado y de su producto, así como el análisis de viabilidad del proyecto como información prioritaria en la búsqueda de artículos bibliográficos en internet.

Además, gran parte de la información específica del reactor de lecho fluidizado, se ha obtenido y contrastado de manera verbal a través de entrevistas con distintos técnicos explotadores de la planta productora de estruvita instalada en la EDAR Sur de Madrid, la cual pertenece a Canal de Isabel II, S.A.

Se ha contrastado con la real academia española, todos los términos que se han utilizado en el presente estudio.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. FÓSFORO EN LAS EDAR

##### 3.1.1. FÓSFORO EN EL AGUA RESIDUAL

Antes de desarrollar el estudio del arte de este trabajo de fin de máster, se tiene que comprender cuál es el objetivo de la instalación de este tipo de reactor: el incremento en la eliminación de fósforo en el proceso de la depuración del agua residual urbana.

#### **Formas de Fósforo en el Agua Residual**

En las aguas residuales se puede encontrar P en las distintas formas que a continuación se detallan [5]:

- Ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) se trata de la forma con mayor asimilabilidad por parte de la biomasa. Son poli-fosfatos oxidados, conforman la parte inorgánica del fósforo encontrándose en unas concentraciones promedio de entre 3 y 7 mg/l.
- Poli – fosfatos ( $\text{PO}_3^{3-}$ )<sub>n</sub>: la agregación de monómeros de fosfato genera estos polímeros. Debido a la actividad de grupos de organismos acumuladores de Poli-fosfatos (en adelante bacterias PAO) se almacenan en el interior de las células de los mismos para su degradación en formas de mayor asimilabilidad como son los ortofosfatos. Su presencia queda reducida al tratamiento biológico.
- Fósforo precipitado (me-P): es la agregación de ortofosfatos y metales, generando un precipitado en forma de sal. De gran concentración en la fase anaerobia del tratamiento biológico, se emplean haluros metálicos como puede ser el Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) para su generación.
- Fósforo orgánico: compuesto por especies como fosfolípidos, ácidos nucleicos y ATP. Conforman la materia orgánica en concentraciones entorno a los 3 mg/l.

### 3.1.2. MARCO NORMATIVO

La Directiva 91/271/CEE establece una serie de requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización. Así lo muestra en su cuadro número 2 representado a continuación:

**Tabla 1. Concentraciones límites de Fósforo y Nitrógeno en el efluente. Fuente Directiva 91/271/CEE.**

<b>Parámetros</b>	<b>Concentración</b>	<b>% mínimo de reducción</b>	<b>Método de medida de referencia</b>
Fósforo Total	1 mg/l P (EDAR > 100000 h.e)	80	Espectrofotometría de adsorción molecular
	2 mg/l P (EDAR < 100 000 h.e)		
Nitrógeno Total	10 mg/l N (EDAR > 100000 h.e)	70-80	Espectrofotometría de adsorción molecular
	1,5 mg/l N (EDAR < 100 000 h.e)		

Es por ello que se requiere la eliminación de las concentraciones de fósforo y nitrógeno hasta los valores anteriormente mencionados.

### 3.1.3. REDUCCIÓN DE FÓSFORO EN LAS EDAR

En las estaciones depuradoras de agua residual (en adelante EDAR), el macronutriente fósforo comienza a reducir su concentración disuelta en agua residual, en el tratamiento biológico o en su caso en el tratamiento físico-químico y continúa sedimentando en el proceso de decantación secundaria. Por lo que se considera fundamental, en este trabajo, describir los procesos imprescindibles de reducción de fósforo y generación de los reboses utilizados por el reactor de lecho fluidizado en la producción de estruvita:

#### **Eliminación de Fósforo en Tratamiento Físico – Químico**

Comienza la eliminación del fósforo en la cámara de mezcla y floculación, en la que se aportan distintos compuestos químicos como son las sales metálicas de aluminio o hierro (en adelante Me). La elección de estos reactivos se rige entre otros por las concentraciones de fósforo y alcalinidad en el influente.



En los casos que se precise la aplicación de este tipo de sales, pero no existan cámaras de mezcla y floculación, se realiza la aplicación de dichos reactivos en la fuente de salida del reactor biológico, donde se aprovecha el salto hidráulico generado para realizar una mezcla lo más homogénea posible.

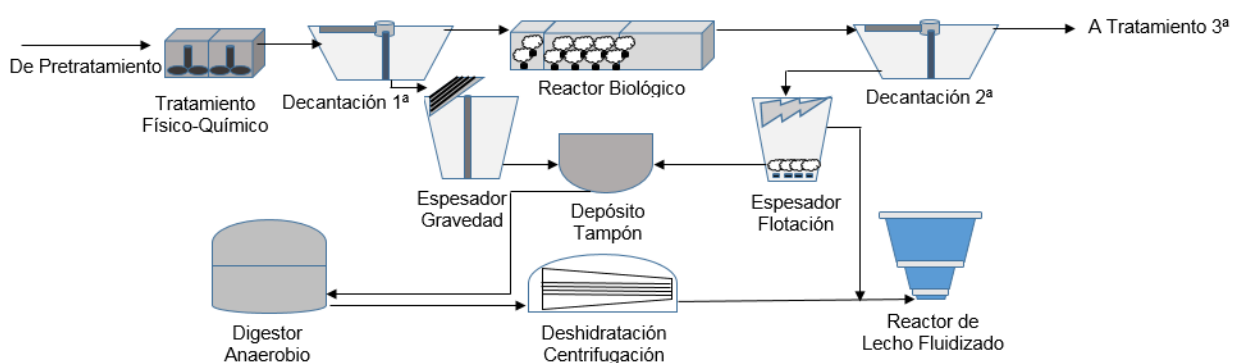
Estas sales provocan la precipitación química del fósforo hasta alcanzar concentraciones en el efluente en torno a 0,5 mg/l. A continuación, se muestra la reacción estequiométrica de precipitación de P [6]:

**Reacción 1. Precipitación de sal de fosfato [6].**



Los principales inconvenientes que se presentan al utilizar este tipo de tratamiento son:

- Se genera un coste externo por la adquisición y tratamiento de reactivos químicos.
- Se genera un coste externo de la instalación y mantenimiento de las infraestructuras involucradas.
- Se crea la posibilidad de incumplir con los parámetros de vertido por las concentraciones de reactivos aplicados.
- Se genera mayor volumen de fango y por tanto coste de su gestión.



**Figura 4. Diagrama de Flujo de Infraestructuras de una EDAR Convencional donde se Produce la Eliminación de Fósforo. Fuente: elaboración propia. \*Ver Anexo II**

## Eliminación de Fósforo en Tratamiento Biológico

En una EDAR convencional tipo [7], se produce la eliminación del fósforo presente en el agua residual mediante un proceso biológico de fangos activados con aireación por difusores de burbuja fina, en el cual se dispone una cámara anaerobia seguida de otra aerobia dentro de un mismo reactor biológico. El proceso de eliminación biológico se describe a continuación [5]:

*Organismos Acumuladores de Polifosfatos:* (en adelante bacterias PAO) en el licor mezcla presente en el reactor biológico se encuentran, entre otras muchas, las bacterias PAO. Se trata del principal grupo de bacterias eliminadoras de fósforo, ya que son capaces de almacenarlo internamente de la siguiente manera:

*1º Fase Anaerobia:* en ella se genera el desprendimiento de fósforo en forma de poli-fosfatos, desde el interior celular de las bacterias PAO hacia el licor mezcla, por lo que se verá incrementada la concentración de fósforo en esta cámara.

El espacio liberado en el interior de las células se reemplaza muy rápidamente por fuentes de energía como son los ácidos grasos volátiles de cadena corta (en adelante AGV), a partir de los cuales se sintetizarán de forma directa, fuentes de carbono y energía como son los polihidroxicanoatos (en adelante PHA). La composición de los PHA dependerá del origen de la fuente de carbono asimilada, pudiendo generarse:

- Poli- $\beta$ -hidroxibutirato (en adelante PHB) si la fuente de carbono es acetato.
- Poli- $\beta$ -hidroxivalerato (en adelante PHV) si la fuente de carbono es propionato.

*2º Fase Aerobia:* en ella se genera el desarrollo de las bacterias PAO a partir del consumo de los PHA. Se produce el proceso inverso al de la fase anaerobia, pues el espacio liberado del consumo de PHA se reemplaza por glucógeno y polifosfatos. El resultado es la acumulación intracelular del P presente en el licor mezcla, generando un efluente con baja concentración de P y un fango compuesto por grandes concentraciones de bacterias PAO cargadas de P.

En las siguientes figuras se esquematiza el proceso de absorción de fósforo por parte de las bacterias PAO en las fases anaerobia y aerobia:

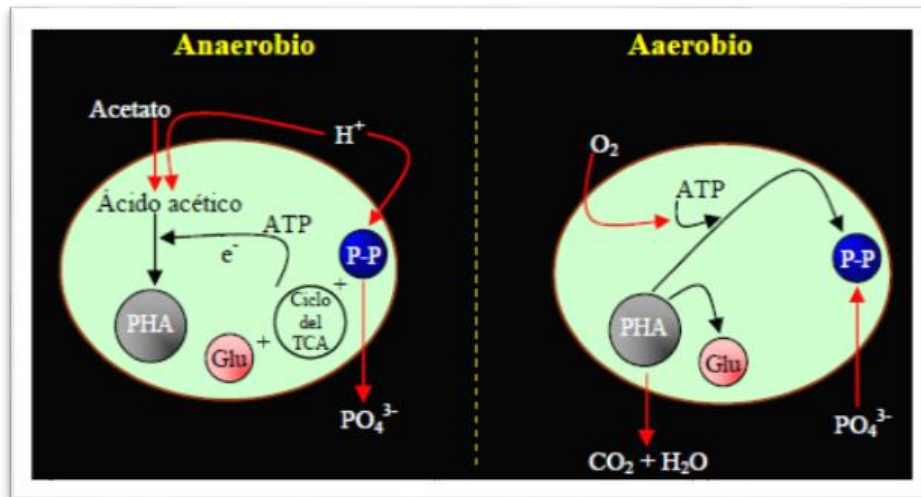


Figura 5. Esquema del metabolismo de las bacterias PAO. Fuente: [6].

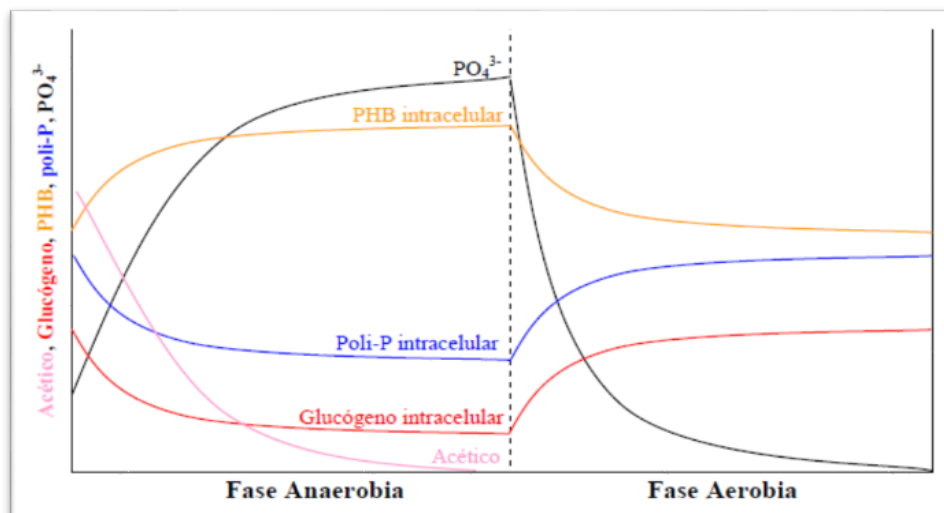


Figura 6. Variación de los distintos componentes presentes en el licor mezcla. Fuente [6].

*Organismos Acumuladores de Glucógeno:* (en adelante bacterias GAO) también se encuentran en el licor mezcla, los cuales son directos competidores de las bacterias PAO, debido a que comparten gran parte de los procesos de su sistema metabólico.

Este grupo de bacterias utilizan AGV para producir los PHA en la zona anaerobia, realizando la síntesis del glucógeno en la zona aerobia sin generar la acumulación de fósforo en ninguna de las formas presentes en el licor mezcla.

Por lo que se puede afirmar que supone una amenaza para el rendimiento de las bacterias PAO, ya que están consumiendo las concentraciones de AGV necesarias para reducir la concentración de fósforo.

Existen estudios que afirman que modificando las condiciones del tratamiento biológico como temperatura, pH y oxígeno disuelto es posible incrementar o reducir el número de bacterias de ambos grupos y por tanto eliminar esta competencia.

Las principales ventajas que presenta la eliminación biológica de fósforo son:

- Se produce una cantidad moderada de fangos con mayor concentración en fósforo.
- Se genera la posibilidad de aplicar los fangos directamente al terreno tras un proceso de deshidratación.
- Se crea la posibilidad de recuperar el fósforo del fango y precipitarlo en forma de fertilizante, como es la estruvita. Generando su consiguiente aporte económico.

### **Eliminación de Fósforo en Decantación**

El objetivo de este tratamiento respecto a la obtención de estruvita, es el de disponer un fango rico en fósforo del cual generar el rebose utilizado por el reactor de lecho fluidizado en su producción. Se localizan típicamente dos tipos de decantación en las EDAR convencionales, [7] primaria y secundaria:

*Decantación Primaria:* proceso en el cual se genera, por acción de la gravedad, la separación de la parte sólida respecto a la parte líquida del licor mezcla. Este proceso se realiza en infraestructuras de tipo cónico o rectangular, compuestas por un conjunto rasquetas inferiores que trasladan el fango sedimentado hacia la arqueta de extracción.

*Espesamiento Primario:* se utilizan espesadores de gravedad con el mismo sistema que la decantación primaria para generar una reducción entorno al 4% del porcentaje de agua contenida en el fango primario. Generando un fango con las características necesarias para su digestión anaerobia [8].

*Decantación Secundaria:* se produce en infraestructuras cónicas o rectangulares donde se almacena el licor mezcla estabilizado en el reactor biológico durante un

tiempo determinado. Gracias a la acción de dos grupos de rasquetas que poseen un movimiento lento transmitido desde el centro del decantador y a la acción de la gravedad, se consigue la separación entre la fase líquida y sólida.

En la fase sólida o fango decantado, se encuentran las bacterias PAO cargadas de polifosfatos necesarios para producir la estruvita. Se genera una división de este fango, un porcentaje se envía a espesamiento y otro mayor se recircula al reactor biológico con el objetivo de mantener una concentración adecuada de sólidos en suspensión en el licor mezcla (en adelante SSML).

*Espesamiento Secundario:* se aprovecha la similitud entre las densidades del fango y agua para separarlos por acción del aire disuelto, este se suministra desde el fondo del espesador a través de un sistema de compresión. Se consigue así reducir el porcentaje de agua en el fango hasta en un 5% [8].

El espesador por flotación posee una base cónica y buzones superficiales donde se recoge el fango ascendido. El sobrenadante generado se recoge a través de vasos comunicantes en un canal circundante, para ser trasladado posteriormente hacia la cámara de entrada del reactor de lecho fluidizado. A continuación, se muestra la composición típica del sobrenadante de flotación, se comprueba que la concentración de fósforo es presente pero baja:

**Tabla 2. Composición típica de la media de valores del año 2019 de los sobrenadantes de espesamiento por flotación. Fuente: elaboración propia.**

pH	STV %	P-PO <sub>4</sub> mg/l	N-NH <sub>4</sub> mg/l
7,07	37,56	5	36

Tras el proceso de espesado se pueden conducir ambos tipos de fangos hacia el proceso de digestión anaerobia o en su caso directamente al proceso de deshidratación:

*Digestión Anaerobia:* se produce en un depósito estanco con pendiente en su base, donde se someten ambos fangos a un proceso lento y anaerobio. Tiene como objetivo reducir la concentración de patógenos y degradar la materia

orgánica por acción de distintos microorganismos. Este proceso se compone de las siguientes etapas [8]:

1. *Fase de Licuefacción o hidrólisis*: en esta etapa la materia orgánica de los lodos se transforma en compuestos orgánicos sencillos y solubles en agua, por acción de las enzimas extracelulares liberadas por las bacterias.

**Reacción 2. Proceso de hidrólisis. Fuente: elaboración Propia.**

**Sustrato no disuelto + Bacterias hidrolíticas = Sustrato orgánico disuelto**

2. *Fase acidogénica o fermentativa*: las bacterias fermentativas transforman el sustrato anterior en ácidos grasos, azufre, dióxido de carbono y agua.

**Reacción 3. Proceso de Fermentación. Fuente: elaboración propia.**

**Sustrato orgánico disuelto + Bacterias fermentativas = Ácidos grasos volátiles, H<sub>2</sub>O, Azufre orgánico e inorgánico y CO<sub>2</sub>.**

3. *Fase acetogénica*: las bacterias acetogénicas y sulfatoreductoras, se encargan de transformar el sustrato anterior en acetato y ácido sulfhídrico.

**Reacción 4. Proceso de acetogénesis. Fuente: elaboración propia.**

**Ácidos grasos volátiles y Sulfatos + Bacterias acetogénicas y sulfatoreductoras = Acetato y Ácido sulfhídrico**

4. *Fase metanogénica*: las bacterias hidrofílicas y acetoclásticas se encargan de catabolizar anaeróbicamente el acetato y el H<sub>2</sub> para producir metano, dióxido de carbono y nitrógeno.

**Reacción 5. Proceso de metanogénesis. Fuente: elaboración propia.**

**Acetato y H<sub>2</sub> + Bacterias hidrofílicas y acetoclásticas = CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + N +  
Otros**

El resultado de la digestión anaerobia son dos bioproductos, el biogás y el digestato o fango digerido, siendo este último imprescindible en la producción de estruvita. Se trata de la mezcla estabilizada de fangos primarios y secundarios la

cual se compone de un 5% de sólidos y un 95% de agua, la cual imposibilita su traslado y aplicación.

Existen distintos destinos para el fango digerido, siendo la aplicación agrícola el más habitual debido a su bajo coste. En la Comunidad de Madrid esta aplicación se rige por:

*El Real Decreto 1310/1990:* fija en 66% el límite de la proporción de materia orgánica contenida en el lodo deshidratado, debido a que con un valor superior se pueden generar nuevos microorganismos provocando procesos de fermentación.

*El Decreto 193/1998:* fija en 80% el límite de humedad que compone el lodo deshidratado, debido a que un mayor porcentaje genera problemas en la aplicación y transporte.

*Deshidratación:* por lo anteriormente mencionado se crea la necesidad de reducir el porcentaje de humedad del fango digerido. Existen distintas tecnologías para la deshidratación de fango como son: filtros prensa, eras de secado y filtros banda. Pero únicamente se compatibiliza la deshidratación vía mecánica por centrifugadoras con el reactor de lecho fluidizado, esto se debe al sistema de conducciones que extraen el sobrenadante. Esta tecnología aplica una fuerza centrífuga al fango para provocar la separación entre la fase líquida y sólida. Dicho equipo se compone principalmente de un rotor con una velocidad de giro entre 2.500 y 3.000 rpm, y un tornillo sinfín alojado en su interior, con velocidad de giro entre 2 y 20 rpm independiente al rotor, pero con mismo sentido [9].

El proceso de deshidratación centrífuga requiere la presencia de un floculante, la mayor parte de las veces es Polielectrolito catiónico o aniónico en función de la composición del fango a deshidratar. Este provoca un aumento en la consistencia del fango y por tanto mayor facilidad de deshidratación. El proceso de deshidratación posee las siguientes partes [9]:

*1º Mezclado y aceleración:* se mezclan los fangos con el floculante en la tubería de entrada y se procede a alcanzar la velocidad del rotor.

*2º Clarificación:* por la acción de la aceleración centrífuga los sólidos sedimentan en el tornillo y el agua se suspende en las paredes del rotor.

3º *Compactación*: el transporte del tornillo sin fin provoca la compactación de los sólidos sedimentados hacia el exterior y el transporte en sentido contrario del agua extraído (en adelante rebose) gracias a su escasa viscosidad.

4º *Compresión*: se produce en la parte cónica del tambor, el tornillo genera un prensado en dirección axial que, junto a la compactación centrífuga, provoca la compresión de los sólidos separándolos así del agua capilar.

El rebose que se obtiene de la deshidratación por acción de centrifugadora es parte de la materia prima de la estruvita. A continuación, se muestran los valores típicos que conforman los sobrenadantes de centrifugación, al igual que los reboses obtenidos de decantación secundaria se verán alterados por el origen y tratamiento previo al que se someta el agua residual:

**Tabla 3. Composición típica de la media de valores del año 2019 de los reboses de espesamiento por centrifugación. Fuente: elaboración propia.**

pH	SSt mg/l	Pt mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l	N-NH <sub>4</sub> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l
7,86	540	180	145,1	927	19,25	50,88

Se observa una elevada concentración en los componentes en comparación con los reboses de flotación. Es por ello que se establecen los sobrenadantes de deshidratación como principal fuente de materia prima para la producción de estruvita. Se destaca la elevada concentración de fósforo y amonio que componen este rebose.

### 3.2. ESTRUVITA – CRYSTALGREEN

Es un mineral fosfato amónico magnésico, formado por la aglutinación de cristales de gran dureza con forma ortorrómbica. Su gran resistencia mecánica se debe a su composición interna, tetraedros de fosfato, octaedros de magnesio y grupos de amonio enlazados entre sí de manera muy estable por puentes de hidrógeno o fuerzas electrostáticas dipolo-dipolo [10].



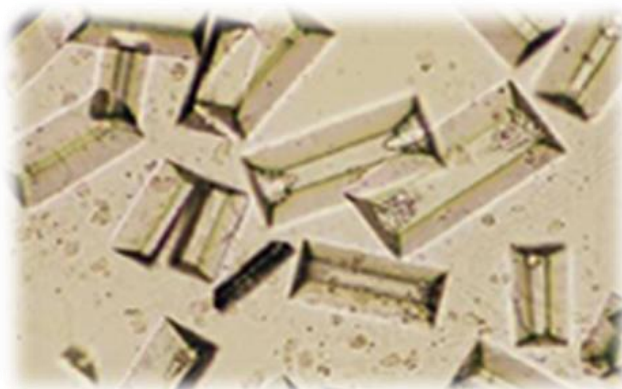
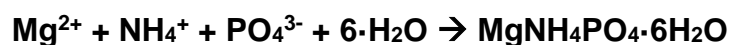


Figura 7: Cristales ortorrómbicos. Fuente: web historiasveterinarias.wordpress.com

En la naturaleza precipita de manera natural en condiciones anaerobias al entrar en contacto una fracción líquida con una otra orgánica como pueden ser acumulaciones de residuos orgánicos o estiércoles.

Reacción 6. Precipitación de CrystalGreen o Estruvita. Fuente: elaboración propia.



Como se observa el orgánulo de estruvita se compone de un mol de magnesio, otro de nitrógeno amoniacal, otro de ortofosfato y seis moléculas de agua.

El reactor Pearl 2000 genera un producto de alta calidad, pureza y libre de patógenos, que lo convierten en una alternativa muy viable para su aplicación como fertilizante inorgánico. Las principales características que la distinguen respecto a otros fertilizantes son:

*Liberación lenta:* la gran dureza descrita con anterioridad provoca una dosificación lenta de sus compuestos. Se genera una reducción en la frecuencia de aplicación y en la cantidad de fertilizante.

*Cloruro magnésico:* la concentración del macronutriente de magnesio genera un aumento en la productividad de distintos cultivos que la demandan, como puede ser el cultivo de aceituna.

Tabla 4. Composición de estruvita. Fuente: elaboración propia [11].

% P-PO <sub>4</sub> y N-NH <sub>4</sub>	% Mg <sup>2+</sup>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	% Materia Orgánica	% H <sub>2</sub> O
43	26	4	4	2	8	13

### 3.2.1. MARCO NORMATIVO

Actualmente la estruvita o CrystalGreen no se encuentra catalogada en el Registro de Fertilizantes del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, por lo que se prohíbe su aplicación en España. Esto se debe a que el origen de sus componentes es el agua residual, lo cual provoca que se catalogue como un residuo de EDAR. No ocurre así en algunos países como Alemania, Holanda, Canadá, Reino Unido y Estados Unidos donde sí se permite su aplicación y comercialización como fertilizante [12]. Es por ello que las plantas productoras de estruvita o CrystalGreen se ven obligadas a exportar su producto a precios inferiores de los de mercado [10].

La aplicación, caracterización y comercialización de fertilizantes en la Unión Europea, se regula por el Reglamento Europeo 2019/1009. En dicho reglamento no se contempla la estruvita como fertilizante, pero si se cataloga como un producto no tóxico para la salud y de gran capacidad fertilizadora, por lo que descarta su categorización como residuo [13].

En el Joint Research Centre (JRC) de la Unión Europea, se crea en 2018, el documento *STRUBIAS Report* [13], en él se recogen las características de distintos fertilizantes compuestos por: estruvita, sales de fosfato, biochars y cenizas. Además, se representan los resultados obtenidos de los ensayos realizados con dichos fertilizantes, por parte de un grupo de expertos de la Comunidad Europea. Entre las conclusiones que obtienen en la aplicación de estruvita en la agricultura son:

- Cumple con todos los parámetros de seguridad y salud.
- Se obtiene un aumento de la conservación del medio ambiente.
- Aumenta la publicidad sobre la utilización de fertilizantes sostenibles.
- Se aconseja su incorporación al Anexo II del Reglamento Europeo 2019/1009, mediante el cual se permite su aplicación como fertilizante en los países miembros a la Unión Europea.

### 3.2.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

A continuación, se detallan las principales ventajas que posee la utilización de estruvita como fertilizante **[10]**:

- Gran capacidad de fertilizar gracias a su composición en  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ . Lo cual genera una alta polivalencia de aplicación en distintos cultivos.
- Larga permanencia en el suelo. Por lo que se produce un ahorro económico, medioambiental en el consumo de fertilizante.
- Se facilita a las especies vegetales la adsorción de nutrientes al ser un fertilizante de liberación lenta.
- Se reduce la contaminación, por macronutrientes, de masas de agua subterráneas y superficiales. La liberación lenta impide procesos de contaminación de ecosistemas y eutrofización.
- Se reduce la degradación de suelos, debido a no existir excesos de concentraciones de macronutrientes, provocado por la liberación lenta provoca.
- No contiene metales pesados, ni patógenos a diferencia de otros fertilizantes, como los sintéticos. Lo que favorece a la salud al no transmitirse a los cultivos.
- Favorece y publicita la estrategia de economía circular de España.
- Favorece a la conservación de las reservas finitas de fósforo.
- Se favorece la actividad enzimática y microbiológica del suelo.

A continuación, se detallan los principales inconvenientes de la utilización de estruvita como fertilizante:

- No se permite su utilización como fertilizante en España y la mayoría de los países europeos.

- Se generan pérdidas económicas en su comercialización, cuando se gestiona de manera indirecta la planta productora. Pues se establecen contratos de compra con cantidades muy inferiores al precio de mercado.
- Se genera un consumo innecesario de bienes y materias primas, aumentando la huella de carbono. Lo provoca la logística de exportación de estruvita o CrystalGreen.

### 3.3. REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

Actualmente en el mercado existen diferentes tipologías de reactores y tecnologías para la obtención de estruvita. Debido a la gran amplitud de información existente, este trabajo se centra en el estudio del reactor de lecho fluidizado de flujo ascendente Pearl 2000, el cual se origina en Vancouver (Canadá) a través de una empresa especialista en crear tecnologías para la recuperación de nutrientes, OSTARA. Dicha empresa nombra al producto que genera su tecnología como CrystalGreen.

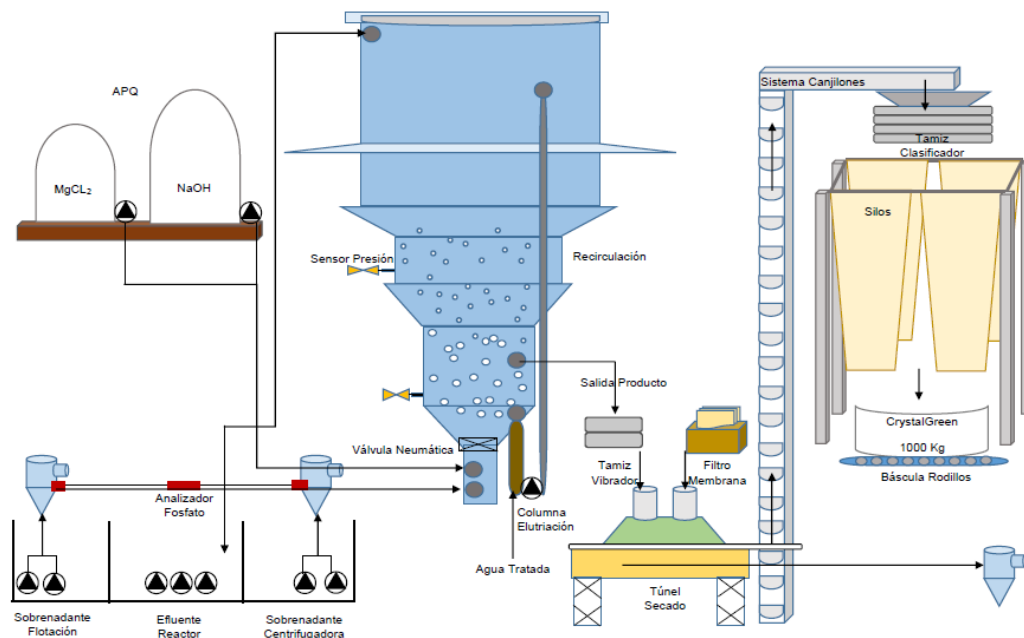


Figura 8. Diagrama de Flujo de una Planta Tipo Productora de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia.

\*Ver Anexo III

La tecnología que utiliza el reactor Pearl 2000 permite eliminar una gran concentración de fósforo en forma de ortofosfatos disueltos en una sustancia líquida, junto con una concentración de nitrógeno en forma amoniacal, generando hasta 2000 Kg diarios, en condiciones favorables, de un fertilizante de alta calidad. Este proceso se realiza en un reactor de 36 m<sup>3</sup> de volumen, con recirculación interna continua y compuesto por cilindros de distintas secciones contruidos en acero inoxidable, AISI 304, unidos de manera ascensional. En el que reaccionan los siguientes componentes **[14]**:

- Sobrenadante de flotación: se establece como componente opcional y secundario reservándose su aplicación únicamente en aquellas situaciones en las que la concentración de sobrenadante de centrifugación sea insuficiente.
- Reboses de centrifugación: se establece como principal componente de la reacción gracias a su alta concentración en ortofosfatos y amonio. En la mayoría de EDAR se utiliza como único sobrenadante.
- Cloruro magnésico: se requiere una disolución saturada en magnesio para generar el proceso de precipitación de CrystalGreen. Este macronutriente se debe aportar de manera externa a través de reactivos químicos como es el cloruro magnésico.
- Sosa cáustica: se requiere una alta concentración de radicales hidroxilos generar el proceso de precipitación. Esta elevación de pH se consigue de manera externa a través de reactivos químicos como es la sosa cáustica.
- Agua Industrial o Potable: se requiere la presencia de un caudal de agua tratada en el proceso de elutriación.

### 3.3.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Los principales parámetros que OSTARA recomienda controlar para generar CrystalGreen de una forma óptima, se mencionan a continuación **[11]**:

- pH: se debe encontrar entre valores de 7 a 11, siendo 7,8 su óptimo. Es por ello que se crea la necesidad de elevar el pH de la neutralidad a la que se

encuentra el agua residual. Existen distintas formas de realizarse, pero el método que más fiable para ello es el aporte de sosa cáustica (NaOH).

- Relación molar  $Mg^{+2}$ ,  $NH^{+4}$  y  $PO_4^{3-}$ : se debe mantener de forma equimolar 1:1:1, además de disponer concentraciones saturadas de los mismos elementos para impedir que se produzca el efecto del ion común, por el que se genera la reducción de iones disponibles al reaccionar con otras especies. Esta saturación se consigue con la regulación del suministro de sobrenadante en el caso del amonio y fosfato, y con la regulación del suministro del cloruro de magnésico en el caso del magnesio [15].
- Temperatura: se relaciona de forma directamente proporcional la producción del reactor con la temperatura, siendo 30°C el valor de óptimo de producción. La temperatura en el interior del reactor se alcanza a través de un intercambio calorífico con la temperatura ambiente.
- $Ca^{2+}$ : su presencia provoca la reducción de la medida, forma y pureza de los cristales de CrystalGreen. Se regula su concentración gracias a analíticas de concentración.
- Tiempo de retención hidráulico: se requieren, de media, 30 minutos de reacción para generar la precipitación de CrystalGreen. La composición del sobrenadante utilizado condicionará la duración de esta reacción.

### 3.3.2. COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN

A continuación, se detallan las partes imprescindibles que intervienen en la generación y gestión de CrystalGreen en el reactor Pearl 2000 [11]:

#### **Sistema de Alimentación:**

Con el objetivo de que la alimentación al reactor sea flexible y continua se diseña un sistema de suministro desde dos puntos distintos. Este sistema se compone de 3 depósitos aislados entre sí:

*Depósito 1:* se compone de 1+1 electrobombas sumergibles, con un caudal de 200 m<sup>3</sup>/h cada una, que bombean el sobrenadante de la deshidratación a la entrada del reactor.

*Depósito 2:* se compone de 1+1 electrobombas sumergibles, con un caudal de 200 m<sup>3</sup>/h cada una, que bombean el rebose de la flotación de fangos a la entrada del reactor.

*Depósito 3:* se compone de 2+1 electrobombas sumergibles, con un caudal de 200 m<sup>3</sup>/h cada una, que bombean a cabecera de EDAR, el efluente del reactor junto a los excesos que se generan en los depósitos 1 y 2.

Mediante un sistema de válvulas se permite generar la mezcla más adecuada entre los reboses existentes o la impulsión de un único sobrenadante al reactor. Además de reconducir los excesos al depósito 3.

Los equipos que se mencionan con anterioridad, entran en funcionamiento de manera automatizada por variadores eléctricos. Los cuales se encuentran comandados por un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (en adelante SCADA) que transforma la señal que obtiene de manera continua de los medidores de concentración de fósforo, tipo Phosfax, ubicados en los depósitos 1 y 2. Y varía la frecuencia de alimentación y por tanto el caudal de las electrobombas, siempre buscando alcanzar la consigna de magnesio que se le establece. Con ello se genera la alimentación más eficiente posible al reactor.



**Figura 9. Electrobombas sumergibles y depósitos. Fuente: Elaboración propia.**

### Dosificación Reactivos Químicos:

La composición de CrystalGreen o estruvita es  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  por lo que se requiere una relación molar 1:1:1 para generar el proceso de precipitación. Tras observar la composición de ambos reboses se comprueba que existen concentraciones suficientes de nitrógeno amoniacal y ortofosfatos para generar estruvita. No siendo así en la concentración de magnesio, por lo que se dosificará en las siguientes formas [14]:

- Cloruro magnésico ( $\text{MgCl}_2$ ): se procesa en industrias químicas y se suministra a las EDAR al 32% de liquidez para evitar la solidificación por bajas temperaturas ambientes. Actualmente es la forma más utilizada gracias a su fiabilidad y logística. Se almacena en un depósito de productos químicos (en adelante APQ) instalado sobre un cubeto de hormigón, se dosifica a través de un conjunto de 1+1 electrobombas dosificadoras de tipo membrana [16].



Figura 10. Depósitos de NaOH y  $\text{MgCl}_2$ . Fuente: Elaboración propia.

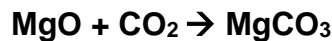
- Bicarbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ): se procesa en un depósito de reacción implantado en la misma EDAR, se provoca la reacción entre el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), subproducto obtenido de la calcinación de la magnesita, con una corriente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) proveniente de los gases de escape emitidos por el proceso de cogeneración. El resultado es bicarbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ). Se utiliza en EDAR muy concretas debido a que precisan



de la instalación de un reactor, la existencia de un proceso de cogeneración e incluso puede ocasionar depósitos de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) alterando la calidad de la estruvita [11].

La aplicación de bicarbonato cálcico al reactor debe ser realizada a través de una disolución acuosa realizada en un preparador automático según las concentraciones requeridas por el proceso.

**Reacción 7. Síntesis de bicarbonato magnésico. Fuente: elaboración propia.**



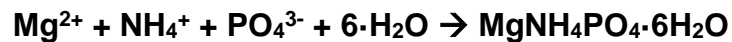
Además, con el objetivo de elevar la concentración de  $\text{OH}^-$  presentes en el medio y por tanto favorecer el proceso de precipitación, se dosificará:

- Sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ): se procesa en industrias químicas y se suministra a las EDAR al 25% de liquidez. Actualmente es la forma más utilizada de elevar el pH de la disolución gracias al reducido tiempo y concentración en los que lo consigue. Se almacena en un APQ instalado sobre un cubeto de hormigón, se dosifica a través de un conjunto de 1+1 electrobombas dosificadoras de tipo membrana.

### **Reactor de Lecho Fluidizado de Flujo Ascendente: Pearl 2000**

Se trata de un reactor de lecho fluidizado de flujo ascendente, en el cual se produce la reacción de precipitación de los cristales de CrystalGreen:

**Reacción 8. Precipitación de CrystalGreen o Estruvita. Fuente: elaboración propia.**



A continuación, se detallan las partes y funcionamiento del reactor:

*Entrada:* se sitúa en la parte inferior del reactor por la que se produce la alimentación de los componentes que a continuación se detallan, esta zona se encuentra aislada del resto del reactor por una válvula automática neumática de guillotina:

- **Sobrenadantes:** se produce a través de una conducción de alimentación para cada sobrenadante, donde se aloja un filtro autolimpiable por línea con luz de malla de 1000 micras y una electroválvula automática.
- **Reactivos químicos:** la dosificación se genera a través de una conducción de inyección para cada reactivo compuesta por una electroválvula automática enclavada al proceso de recirculación, entrando en servicio o fuera de servicio la una con la otra.

*Recirculación:* se compone de una conducción de unión entre la parte superior del reactor con la entrada. En esta conducción se aloja una electrobomba de hélice, con caudal de 500 m<sup>3</sup>/h, la cual es la encargada de generar una velocidad continua ascensional desde la zona inferior provocando la fluidización del lecho y la separación en todo momento de los cristales.

Al obtener el efluente de la parte superior del reactor, extrae los cristales de menor peso y por tanto tamaño, utilizados en el proceso de siembra.

*Columna Elutriación:* se aloja en la parte inferior de la conducción de recirculación. Se encuentra fabricada en polímero, tipo metacrilato, donde se produce la mezcla entre el efluente recirculado del reactor y una corriente de agua tratada o industrial externa a la planta de estruvita. El objetivo de esta mezcla es generar una corriente ascensional que provoque la sedimentación de los cristales de mayor tamaño, permitiendo únicamente el paso al reactor de aquellos de menor tamaño que se requieren para provocar la siembra.

Se conoce como siembra al proceso inicial por el cual se inocula al reactor una concentración establecida de cristales de estruvita en forma de polvo, tamaños micrométricos, sobre los cuales se va a generar el proceso de precipitación del fosfato amónico magnésico. Dotando a los cristales de la dureza, morfología y calidad deseada.

*Salida Producto:* el reactor se ha diseñado específicamente para albergar el producto, con las características más adecuadas de aplicación, en la zona intermedia. Es por tanto en esta zona, donde se instala la conducción de salida del producto, que une el reactor con el sistema de secado. En ella se alberga una

electroválvula automática que permite o impide el paso de producto, esta se alimenta de manera temporizada o por un lazo de control comandado por dos sensores de presión instalados en la parte superior e inferior del reactor. La diferencia de presiones establece la cantidad de CrystalGreen almacenado y programa su purga.

*Salida Efluente:* se compone de una conducción instalada en la zona más elevada del reactor. Supone un aliviadero para los efluentes que genera el reactor, los cuales se trasladan hacia el depósito 3 o de excesos para su posterior retorno a cabecera de planta a través de la acción de la gravedad. Insertada a la misma se encuentra una conducción de agua tratada o industrial que tiene como objetivo diluir la concentración del efluente y por tanto evitar la sobresaturación de iones que provocan la inhibición del posible proceso de precipitación de cristales en la conducción.

En algunos reactores se ha dispuesto de un clarificador de tipo “*Morning Glory*” de forma cónica el cual se instala en la zona más céntrica del reactor y une su vértice con la salida del efluente. Con él se genera un vertido perimetral y equiparado por toda su superficie y reduciendo consigo la entrada de cristales al ser obstaculizados por la base del mismo. Se debe destacar que el diseño de este clarificador no es de la empresa OSTARA, se trata de una mejora del explotador.



Figura 11: Reactor. Fuente: elaboración propia.



Figura 12: Superficie. Fuente: elaboración propia

Todos los procesos que se generan en el reactor y en general, en la planta de producción de CrystalGreen, se controlan de manera automatizada y comandada desde el SCADA de planta. Se realiza a través de analizadores automáticos que proporcionan información continua de los parámetros de operación mencionados anteriormente. En la mayor parte de las plantas, se establece un enclavamiento por el cual, si durante la explotación se registrasen valores superiores o inferiores a las consignas establecidas, se actuará sobre la válvula neumática de acción directa instalada en la entrada del reactor, aislándolo por completo.

A continuación, se muestra la composición analítica del efluente generado por el reactor:

**Tabla 5. Composición típica de la media de valores del año 2019 del efluente de un reactor PEARL 2000. Fuente: elaboración propia.**

SST mg/l	Pt mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l	N-NH <sub>4</sub> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l
560	66	26,2	822	39,2	63,64

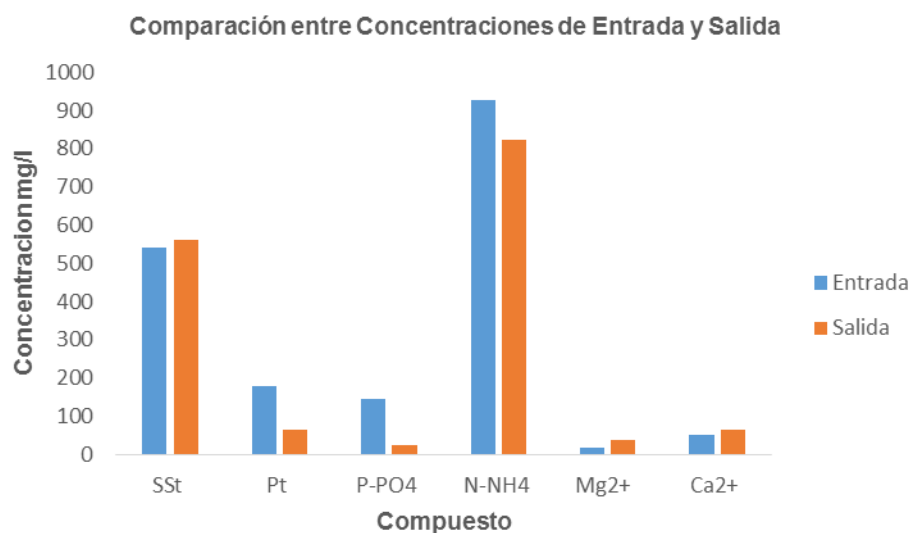
Se puede apreciar el siguiente aumento y reducción respecto al sobrenadante de entrada procedente de la deshidratación por centrifugación:

**Tabla 6. Aumento y reducción de los componentes típicos del sobrenadante de centrifugación tras el proceso de precipitación de estruvita. Fuente: elaboración propia.**

% REDUCCIÓN			% AUMENTO		
Pt	P-PO <sub>4</sub>	N-NH <sub>4</sub>	SSt	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
63,34	81,95	11,32	103,7	203,6	125

- Pt y P-PO<sub>4</sub>: se observa una reducción considerable de la concentración de entrada al reactor. Existen evidencias contrastadas para confirmar que se ha alcanzado el objetivo principal de la instalación del reactor de lecho fluidizado, además de favorecer el proceso de depuración al reducir la concentración que se recircula a cabecera [17].

- N-NH<sub>4</sub>: se observa una reducción moderada de la concentración de nitrógeno amoniacal de entrada a reactor, lo cual favorece el proceso de depuración al reducir la concentración recirculada a cabecera.
- SSt: el insignificante aumento en la concentración de sólidos en suspensión se puede justificar por el porcentaje de polvo de estruvita que abandona el reactor sin lograr precipitar. Es por ello que también se puede confirmar un buen rendimiento del reactor.
- Mg<sup>+2</sup>: se observa un elevado aumento en la concentración de magnesio, este se genera por la cantidad de iones de magnesio incapaces de reaccionar en el reactor quedando libres en el efluente. Debido a que el magnesio supone un elemento limitante en las concentraciones de los reboses, se incorpora a la reacción de manera saturada.
- Ca<sup>+2</sup>: se comprueba un aumento en la concentración de calcio, este es incorporado al reactor el proceso de elutriación realizado con agua tratada o industrial. Proporciones de concentración superiores a 1/2 de Ca<sup>+2</sup>/Mg<sup>+2</sup> no son adecuadas para su utilización en la generación de estruvita [18].



**Figura 13: Comparación entre la concentración de componentes de entrada y la de salida en un reactor Pearl 2000. Fuente: elaboración propia.**

### **Deshidratación del Producto:**

En el proceso de secado de CrystalGreen, se reduce su humedad hasta un 90% dotándola de las características necesarias para su comercialización y posterior aplicación, este se compone de las siguientes partes:

*Tamiz vibrante:* posee forma cónica, al cual accede por la parte superior la solución de CrystalGreen y agua procedente del reactor. Se compone un de sistema vibrador que provoca la separación entre el producto y el agua de exceso. El producto se traslada por un aliviadero hacia el túnel de resistencias y el agua de exceso se desaloja por la base del tamiz hacia el depósito 3 de excesos.

*Extractor de aire:* se sitúa dentro de la sala de reacción, extrae aire atmosférico y lo conduce hasta un filtro de membrana del cual se extrae el aire purificado con las características necesarias para su aplicación.



**Figura 14: Tamiz vibrante. Fuente: elaboración propia.**

*Túnel de resistencias:* Se compone de un conjunto de resistencias que mantienen una temperatura constante igual a 60°C. Por él se hace transitar el aire que se obtiene en el extractor, aumentando su temperatura a la de consigna.

*Bandeja vibratoria:* sistema transportador por el que se hace transitar, por su base, el aire que genera en el túnel y los cristales tamizados, por su costado. Posee una bandeja perforada, por la que penetra el aire, y un sistema de vibración que provoca el traslado y bote de los cristales. Se genera con ello una reducción completa del porcentaje de humedad.

El aire a altas temperaturas, junto con las partículas en suspensión que se obtienen tras este proceso se conduce a un filtro ciclónico para su posterior emisión al exterior.



Figura 15: Sistema de deshidratación. Fuente: elaboración propia.

### **Clasificación y Envasado:**

A partir de este proceso se obtiene un producto clasificado y envasado, se compone de las siguientes partes:

*Canjilones elevadores:* se sitúan a la salida del sistema de deshidratación, se encargan de elevar, a través de un proceso mecánico, el producto seco hasta un juego de tamices.

*Conjunto de tamices:* se compone de un juego de cuatro tamices que poseen 0,9 mm, 1,5 mm, 3 mm y 4,5 mm de luz de malla. Los parámetros de la planta de explotación se encuentran ajustados para producir un producto de diámetro igual a 1,5 mm por lo que es el tamiz que más se utiliza. Esto se debe a que los estudios realizados indican que es el tamaño de cristal más adecuado para la aplicación agrícola.

*Silos:* se encuentra un silo geotextil, de gran resistencia mecánica y 9 toneladas de capacidad, alojado a cada uno de los tamices. En la parte inferior de los silos se encuentra una válvula de guillotina automatizada neumática común para los cuatro. Dicha válvula se acciona de manera automática a través del SCADA de planta, al que previamente se han establecido las consignas de llenado.

*Báscula digital:* se trata de una báscula de tipo rodillos, homologada por el comercio vigente, que se sitúa de forma manual bajo la válvula automática. Se establecerá en SCADA la consigna en número de kilogramos que se deseen incorporar a cada bigbag. La báscula supone un lazo de control a la válvula automática, provocando su cierre o apertura en función de los Kg almacenados, actualmente se establece la cantidad de una tonelada exacta para el envasado del producto.

Esta báscula tiene la característica de poseer un sistema de vibración que genera un reparto equitativo del producto en el interior de la bigbag. El traslado de dicha saca hacia el almacén para su posterior distribución, se produce de forma manual por medio de una carretilla elevadora.



**Figura 16: Tamiz clasificador.**  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 17: silos de almacenamiento.**  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES

A continuación, se detallan las principales ventajas que posee la utilización de un reactor de lecho fluidizado en una EDAR:

- Se genera el control sobre la precipitación espontánea de estruvita en el conjunto de instalaciones, reduciendo consigo la obstrucción de conducciones e incidencias o averías en equipos.



- Se reduce la concentración de macronutrientes, nitrógeno y fósforo, en el efluente generado. Con su consiguiente reducción del proceso eutrofización de masas superficiales.

Por este proceso, se genera un exceso de nutrientes en las masas de agua que incrementan la velocidad de crecimiento natural de algas y especies vegetales en la superficie de las mismas. Por ello se generan los siguientes cambios **[19]**:

*Biológicos:* aumento de fitoplancton, algas verdiazules y bacterias, provocando el desplazamiento o intoxicación de organismos.

*Químicos:* se reduce la concentración de oxígeno disuelto y luz en las capas inferiores, generándose la muerte de todos los organismos que se alimentan de ellos.

*Físicos:* se reduce la circulación de las masas de agua al encontrar los obstáculos por organismos muertos.

Estos cambios generan la desaparición de todo el ecosistema existente en las aguas superficiales afectadas. A demás de los impactos que se derivan de ellos, como puede ser el impacto económico generado por la pérdida de distintas actividades como el turismo.

- Se reduce la concentración de macronutrientes en los fangos generados.
- Se genera un ahorro económico y medioambiental al reducirse la aplicación de reactivos químicos utilizados en la reducción de concentraciones de fósforo y nitrógeno, como se trata del cloruro férrico.
- Se recupera la totalidad de la inversión generada en la construcción de la planta de explotación de estruvita en un periodo de 9 años, véase *punto 3.4.4*.
- Se obtiene un ingreso económico por la venta del fertilizante generado a partir de materias primas de bajo coste o nulo.
- La tecnología que se aplica en la instalación del reactor es de coste asequible y de coste bajo para la de mantenimiento.

- La obtención de fósforo que se genera en este reactor contribuye a paliar su escasez en la tierra y el impacto ambiental generado de su obtención.
- La producción de fósforo en este reactor impide la desaparición de los acúmulos explotados en la tierra. Debido a que se trata de un macronutriente finito en la naturaleza.

A continuación, se detallan los principales inconvenientes que posee la utilización de un reactor de lecho fluidizado en una EDAR:

- Se genera la precipitación de estruvita en todo el sistema del reactor de lecho fluidizado provocando obstrucciones en sus componentes.
- Se produce un gasto económico y ambiental relacionado con el consumo de ácido cítrico o clorhídrico empleado en el proceso de limpieza. Este proceso se realiza periódicamente mediante el cual se suministra una solución ácida por toda la instalación la cual satura de protones la instalación eliminando el precipitado.
- Debido a incidencias en el proceso, se aumenta la concentración de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio del influente de entrada a la EDAR. Al recircular los excesos de la planta de reacción hacia cabecera.

#### 3.3.4. COMPARATIVA DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS

Existen numerosos métodos para eliminación del fósforo de las aguas residuales, la aplicación de cada uno de ellos depende del origen del agua residual y procesos al que se someta dentro de la EDAR. A continuación, se muestran los más utilizados [11]:

*Reactor de Mezcla Completa:* es capaz de reducir la concentración de fósforo hasta valores de un 80%. Se compone de un reactor de forma cilíndrica con agitador, el cual genera la mezcla completa del efluente generando los mismos de manera directamente proporcional a los de entrada. El proceso de mezcla se realiza de manera continua e inmediata.

*Reactor de Lecho Fluidizado:* es capaz de reducir la concentración de fósforo hasta valores de un 97%. Se trata del reactor más eficiente, con mejor facilidad de mantenimiento, lo que le convierte en el reactor más explotado en la reducción de la concentración de fósforo en las EDAR.

*Reactor de Lecho Empacado:* es capaz de reducir la concentración de fósforo hasta valores de un 64-69%. Se trata de un reactor tubular relleno de materiales de empaque, los cuales provocan un aumento de la superficie de contacto y por tanto de reacción. La principal ventaja de este tipo de reactor es su reducido tamaño.

En los tres casos anteriores se deben mantener los parámetros de operación que se mencionan en este estudio para generar el proceso de precipitación.

**Tabla 7. Capacidad de reducir fósforo en distintos reactores. Fuente: elaboración propia a partir de datos [11]**

Mezcla Completa	Lecho Fluidizado	Lecho Empacado
<80%	<97%	<69%



**Figura 18: CrystalGreen. Fuente: elaboración propia.**

### 3.4. ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Con el objetivo de conocer la viabilidad de la instalación de una planta de producción de estruvita o CrystalGreen en una EDAR convencional, se realiza el siguiente análisis financiero:

Es importante destacar que las cifras que se mencionan en este análisis son aproximadas ya que no se han obtenido directamente del presupuesto del proyecto, o en su caso, se han estimado al no poseer información sobre las mismas. Además, existen datos en este análisis que son específicos de la EDAR Sur de Madrid con un caudal autorizado de vertido de 561.086 m<sup>3</sup>/día [7], y de la EDAR de El Prat de Llobregat con un caudal autorizado de vertido de 95.000 m<sup>3</sup>/día [2]. Sería erróneo extrapolarlas a otro tipo de instalaciones debido que varían las condiciones de obra, explotación, mantenimiento, etc.

Se realiza la clasificación de los costes presentes por esta tecnología en: costes de inversión inicial, de explotación y mantenimiento.

#### 3.4.1. COSTES DE INVERSIÓN INICIAL

En este punto se estiman los costes de obra civil, equipos mecánicos y eléctricos, plan de gestión de residuos y plan de seguridad y salud. Los cuales se generan en la fase construcción de la planta de producción de CrystalGreen, con reactor de lecho fluidizado tipo Pearl 2000, en la EDAR Sur de Madrid [14]:

**Tabla 8: Costes de la fase de construcción de planta productora de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos de [2] y [14].**

Obra Civil	Equipos Mecánicos	Equipos Eléctricos	Plan Gestión Residuos	Seguridad y Salud	Total [7]
458.240,00 €	1.308.240,00 €	258.240,00 €	131.740,00 €	143.540,00 €	<b>2.300.000,00 €</b>

Los datos anteriores se han estimado a excepción del total que se ha obtenido de datos aportados por Canal de Isabel II, S.A. [14]

### 3.4.2. COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

En este punto se estiman los costes relacionados con el consumo de cloruro de magnesio, hidróxido de sodio, eléctrico, operación y mantenimiento de equipos. Que se generan en la fase de explotación de la planta de producción. Se supone que la planta se encuentra en servicio 24 horas diarias, entrando en parada únicamente en los momentos de mantenimiento o avería. Se estima un periodo de 25 años de explotación [2]:

*Cloruro de magnesio:* se estima un consumo de magnesio en torno a 200 kg/día en un reactor tipo Pearl 2000. Actualmente el precio del cloruro de magnesio se estima en torno a 0,85 €/kg. Por lo tanto, el gasto anual que ocasiona el consumo de magnesio es aproximadamente 62.050,00 €.

*Hidróxido de sodio:* se estima un consumo de sosa en torno a 1 m<sup>3</sup>/día en un reactor tipo Pearl 2000. Actualmente el precio del hidróxido de sodio se estima en torno a 300 €/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, el gasto anual que ocasiona el consumo de magnesio es aproximadamente 109.500,00 €.

*Ácido Clorhídrico:* se estima un consumo de ácido clorhídrico en torno a 75 kg/mes. Actualmente el precio del ácido clorhídrico se estima en torno a 1,10 €/kg. Por lo tanto, el gasto anual que ocasiona el consumo de ácido clorhídrico, que se destina a la limpieza de la instalación, es aproximadamente 990,00 €.

*Consumo eléctrico:* se estima un consumo eléctrico en torno a 840 kWh/día en una planta productora con reactor tipo Pearl 2000. Actualmente el precio del kilovatio, según la tarifa del año 2019, es 0,092 €/kWh. Por lo tanto, el gasto anual que ocasiona el consumo eléctrico es aproximadamente 28.207,20 €.

*Coste operación:* se estima un precio de 70 €/día por operario de explotación de planta. Se supone un gasto de dos operadores por día. Suponiendo un coste anual en mano de obra de 51.100,00 €/año.

*Coste mantenimiento equipos:* se estima un coste de 20.000,00 €/año de mantenimiento y subsanación de averías e incidencias.

La suma de los gastos anteriores asciende a **271.847,20 €** al año.

### 3.4.3. INGRESOS DE PLANTA

Se realiza la clasificación de los ingresos obtenidos por la utilización de esta tecnología. Se supone que la planta se encuentra en funcionamiento 24 horas diarias, entrando en parada únicamente en los momentos de mantenimiento o avería. Se estima un periodo de 25 años de explotación [2]:

*Estruvita o CrystalGreen:* en condiciones favorables el valor de 1000 kg de producto en el mercado puede alcanzar 1000 \$ o lo que es lo mismo 920,75 €. Debido a que existen diferencias muy altas de precios, se elige un valor desfavorable de 250€/t. El reactor de lecho fluidizado Pearl 2000 puede producir, en condiciones favorables, 2000 kg/día. En un año se podrá obtener un beneficio económico de la venta del fertilizante de 730.000 €.

*Cloruro Férrico:* se genera un ahorro en el coste de operación, provocado por la reducción del consumo de cloruro férrico destinado a la reducción de fósforo. Se estima un precio de 1.100 €/t de cloruro férrico. En una planta convencional que disponga de reactor de lecho fluidizado tipo Pearl 2000, previa instalación de reactor, se consumirán en torno a 200 toneladas de cloruro férrico al año. Se obtiene un ahorro de 220.000 €/año del consumo de  $FeCl_3$ .

*Precipitados incontrolados:* se obtiene un ahorro económico generado por la ausencia de mantenimientos específicos generados por la precipitación de estruvita en instalaciones y equipos en torno a 90.000 €/año.

La suma de los beneficios anteriores asciende a **1.040.000€** al año.

A parte de los beneficios cuantificados en este punto, existen múltiples beneficios que se obtienen de la instalación de este tipo de plantas productoras. Los cuales son muy difíciles de cuantificar, pero se reflejan en el punto número 3.2.3. de este trabajo.

En este estudio, únicamente se han descrito los impactos positivos que genera la implantación del proyecto sobre la EDAR. Sin embargo, existen impactos negativos de escasa magnitud e interés para este estudio. Se debe conocer que el proyecto de instalación de una planta de producción de estruvita contempla

medidas correctoras para mitigar e incluso suprimir las afecciones que se generan sobre la EDAR y su entorno.

#### 3.4.4. ESTUDIO DE VIABILIDAD

Para calcular el coste anual equivalente (en adelante CAE) y el coste financiero de la producción de estruvita, se supone una tasa de descuento del 4% y un periodo de duración o vida útil de 25 años. Esto se debe a que no se ha encontrado información sobre los mismos.

**Tabla 9. Representación del Coste Anual Equivalente y Coste Financiero de la instalación de una planta de producción de estruvita.**

<b>ANÁLISIS FINANCIERO</b>					
<b>Tipo Coste</b>	<b>Precio Contrato</b>	<b>CAE</b>	<b>Cantidad Diaria Producida</b>	<b>Cantidad Anual Producida</b>	<b>Coste Financiero Inversión Anual/kg producidos en un año</b>
Inversión Inicial	2.300.000,00 €	147.227,51 €			
Explotación y Mantenimiento (25 años)	6.796.180,00 €	435.036,82 €	2.000 kg/día	730.000 kg/año	<b>0,7976 €/kg</b>
<b>Total</b>	<b>9.096.180,00 €</b>	<b>582.264,33 €</b>			

Se ha estimado una tasa de descuento del 4%, y una vida útil de 25 años.

A continuación, se realiza un balance entre: la suma de los gastos de la fase de construcción, más los de la fase de explotación y mantenimiento prorrogados durante la vida útil de la planta de producción. Y los beneficios anuales que se obtienen de la misma planta, el resultado es el tiempo en el que se amortiza dicha instalación.

**Tabla 10. Balance de gastos frente a beneficios y tiempo de amortización.**

<b>Coste Inversión Inicial</b>	<b>Coste Mantenimiento y Explotación (25 años)</b>	<b>Beneficios Anuales</b>	<b>Tiempo Amortización</b>
2.300.000 €	6.796.180 €	1.040.000 €	8,74 años

- Se calcula un periodo de **9 años** de explotación para la amortización total de la planta de producción de estruvita.
- Sí en un día se producen 2 t de estruvita, y se requieren 9 años para la total amortización de la planta de producción. Se requerirá un total de 6.570 t de estruvita para generar la amortización.
- Se conoce que en la EDAR Sur de Madrid se ha establecido una consigna entorno a los 300 kg de P-PO<sub>4</sub>/día de alimentación al reactor Pearl 2000. Según la composición tipo del rebose de deshidratación centrífuga, se obtiene una concentración media, en el año 2019, de 145 ppm. A través de un cambio sencillo de unidades, se obtiene un caudal diario de alimentación a reactor de 2.068,96 m<sup>3</sup>. O lo que es lo mismo de 86,20 m<sup>3</sup>/hora.

Si en un día se requieren en torno a 2.068,96 m<sup>3</sup> de rebose de deshidratación, en 9 años, se requerirán 6.796.533,6 m<sup>3</sup> de rebose de deshidratación para conseguir amortizar la planta de producción.

El análisis expuesto, no se puede considerar como un análisis exacto, sino que se debe considerar como aproximado. Esto se debe a que los datos aplicados se han obtenido de proyectos y artículos desarrollados, y por motivos de limitación de datos, no se han podido obtener de manera directa del presupuesto de instalación, mantenimiento y explotación de una planta productora de estruvita a partir de un reactor de lecho fluidizado.



### 3. DISCUSIÓN

La aplicación del reactor de lecho fluidizado como productor de estruvita, constituye un avance significativo hacia la sostenibilidad de los procesos de depuración en lo relativo al consumo de energía y la reducción en la generación de residuos, aproximándose a los criterios de economía circular.

Este cambio de paradigma en el proceso de depuración se traduce, no solo en un menor impacto ambiental sino también en una reducción significativa de los costes de tratamiento.

En este sentido, las EDAR podrían llegar a transformarse de sistemas de tratamiento de residuos (agua contaminada y fangos) a sistemas de generación de energía y bioproductos.

No obstante, a pesar del incipiente desarrollo tecnológico, la mayoría de las EDAR no disponen de esta tecnología, ya sea por su antigüedad o por la capacidad de tratamiento, que hace inviable la implementación del reactor de lecho fluidizado.

La instalación de una planta productora de estruvita, en las EDAR con capacidad media de tratamiento igual o superior a los 95.000 m<sup>3</sup> diarios. Supone una alternativa económica totalmente viable y rentable.

La producción del fertilizante, estruvita o CrystalGreen, supone un gran avance en la recuperación de fósforo de manera artificial, cumpliendo con las estrategias marcadas por la economía circular.

La aplicación del fertilizante en el sector agrícola evidencia, en el momento de su legalización, una sustitución en el uso de los fertilizantes actuales. Esto se debe a su gran capacidad de fertilización y en mayor medida a la conservación que genera sobre el medio ambiente.

#### 4. CONCLUSIONES

En las EDAR la eliminación biológica de fósforo se realiza principalmente por las bacterias PAO, las cuales acumulan los ortofosfatos presentes en el agua residual, para precipitarlos en forma de fango. El metabolismo de estas bacterias se encuentra condicionado por la presencia de las bacterias GAO.

El fango generado se caracteriza como una fuente imprescindible de producción de reboses, se obtienen a través de los espesamientos por flotación y centrifugación. A partir de estos reboses, el reactor de lecho fluidizado produce un precipitado en su interior, en forma de fertilizante de alta calidad, estruvita.

La precipitación controlada favorece la eliminación de los macronutrientes fósforo y nitrógeno del efluente. Evitando problemas como la precipitación incontrolada de estruvita en equipos e instalaciones y problemas de contaminación por eutrofización en cauces receptores. Todo ello, con sus consiguientes beneficios económicos y medioambientales.

Pese a ello, a consecuencia de la recirculación del efluente generado por la planta de producción, se incrementa la concentración de calcio y magnesio en el agua bruta de entrada a la EDAR.

La instalación de este tipo de tecnología en las EDAR, cumple estrictamente con las estrategias de la economía circular, reduciendo el consumo de recursos y aumentando la disponibilidad del fósforo como elemento finito. Se calcula un periodo de entorno a los 9 años de explotación, para amortizar en su totalidad el coste de instalación, mantenimiento y explotación de una planta tipo, así como para comenzar a obtener beneficios económicos de la venta de estruvita.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

### *Artículos Consultados*

- [1]. Organización de las Naciones Unidas. (2019). Comunicado de prensa.
- [2]. Muñoz, E. (2015). Simulación de la implantación de diferentes tecnologías de recuperación de fósforo en una EDAR.
- [3]. Glym Henry, J. Heinke, W. (1999). Ingeniería Ambiental. Pearson Educación.
- [4]. Ghosh, S., Lobanov, S., & Lo, V. K. (2019). An overview of technologies to recover phosphorus as struvite from wastewater: advantages and shortcomings. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- [5]. Acevedo Juárez, B. (2016). Estudio y modelación matemática del cambio metabólico de las bacterias responsables de la eliminación biológica de fósforo en el tratamiento de aguas residuales (Doctoral dissertation). Universitat Politècnica de València.
- [6]. Barbe, J., Desjobert, C., Neveu, G. (2000). Eliminación de fosfatos en aguas residuales urbanas. *Artículos Técnicos*, 197.
- [7]. Nuevo, D. (2020). Ficha técnica de EDAR Sur de Madrid.
- [8]. Gálvez, M. A. (2007). Operación de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Tratamiento de fangos. Canal de Isabel II, S.A.
- [9]. Gálvez, M.A. (2014). Tratamiento de fangos avanzados. Canal de Isabel II, S.A.
- [10]. M.C. Lobo. (2020). Evaluación de la capacidad fertilizante de la estruvita (Fase I y II). IMIDRA.
- [11]. Sánchez, E., Rodríguez, B., Heredero, R., García Peñuela, R., Polo, A., García, M., Sanz, R. (2011). Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II. *Cuadernos de I+D+I*.
- [12]. Zamora, P., Georgieva, T., Salcedo, I., Elzinga, N., Kuntke, P., & Buisman, C. J. (2017). Long-term operation of a pilot-scale reactor for phosphorus recovery

as struvite from source-separated urine. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(5), 1035-1045.

**[13].** Huygens, D., Saveyn, H. G. M., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009). FeHPO CaHPO, 4.

**[14].** Spain's first phosphorus recovery plant. (2017). FuturEnviro.

**[15].** Shaddel, S., Ucar, S., Andreassen, J. P., & Østerhus, S. W. (2019). Engineering of struvite crystals by regulating supersaturation–correlation with phosphorus recovery, crystal morphology and process efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102918.

**[16].** Wang, J., Ye, X., Zhang, Z., Ye, Z. L., & Chen, S. (2018). Selection of cost-effective magnesium sources for fluidized struvite crystallization. *Journal of Environmental Sciences*, 70, 144-153.

**[17].** Shih, Y. J., Abarca, R. R. M., de Luna, M. D. G., Huang, Y. H., & Lu, M. C. (2017). Recovery of phosphorus from synthetic wastewaters by struvite crystallization in a fluidized-bed reactor: effects of pH, phosphate concentration and coexisting ions. *Chemosphere*, 173, 466-473.

**[18].** Liu, X., & Wang, J. (2019). Impact of calcium on struvite crystallization in the wastewater and its competition with magnesium. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122121.

**[19].** H. Zouiten. (2012). Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas. Universidad de Cantabria.

***Enlaces web Consultados***

[www.hrs-heatexchangers.com](http://www.hrs-heatexchangers.com)

[www.quotidiano.com](http://www.quotidiano.com)

[www.tecpa.es](http://www.tecpa.es).

[www.historiasveterinarias.wordpress.com](http://www.historiasveterinarias.wordpress.com)

[www.noticiastecnoagricola.es](http://www.noticiastecnoagricola.es)

[www.naturclara.com](http://www.naturclara.com). Proveedor de Ácido Clorhídrico.

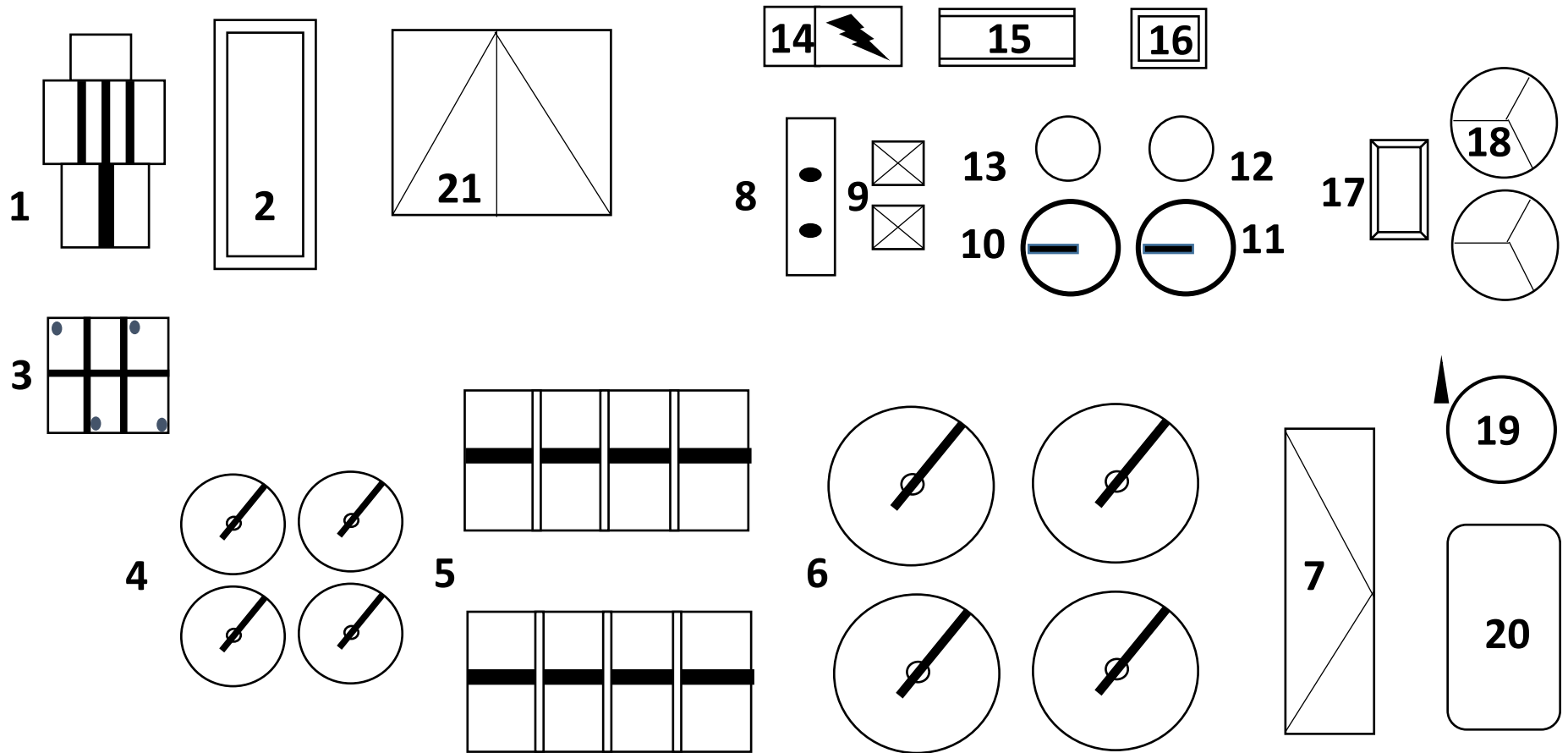
[www.tematicas.org](http://www.tematicas.org)

[www.rae.es](http://www.rae.es)



## **ANEXO I**

**Planta General de las Infraestructuras de una EDAR Convencional Productora de Estruvita. Fuente: elaboración propia.**



1.- Obra de Llegada y Pretratamiento  
 2.- Tanque de Tormentas  
 3.- Tratamiento Físico-Químico  
 4.- Decantación Primaria  
 5.- Tratamiento Secundario

6.- Decantación Secundaria  
 7.- Tratamiento Terciario  
 8.- Deshidratación  
 9.- Tolvas Fango Deshidratado

10.- Espesador Gravedad  
 11.- Espesador Flotación  
 12.- Deposito Tampón  
 13.- Espesador Fango Digerido

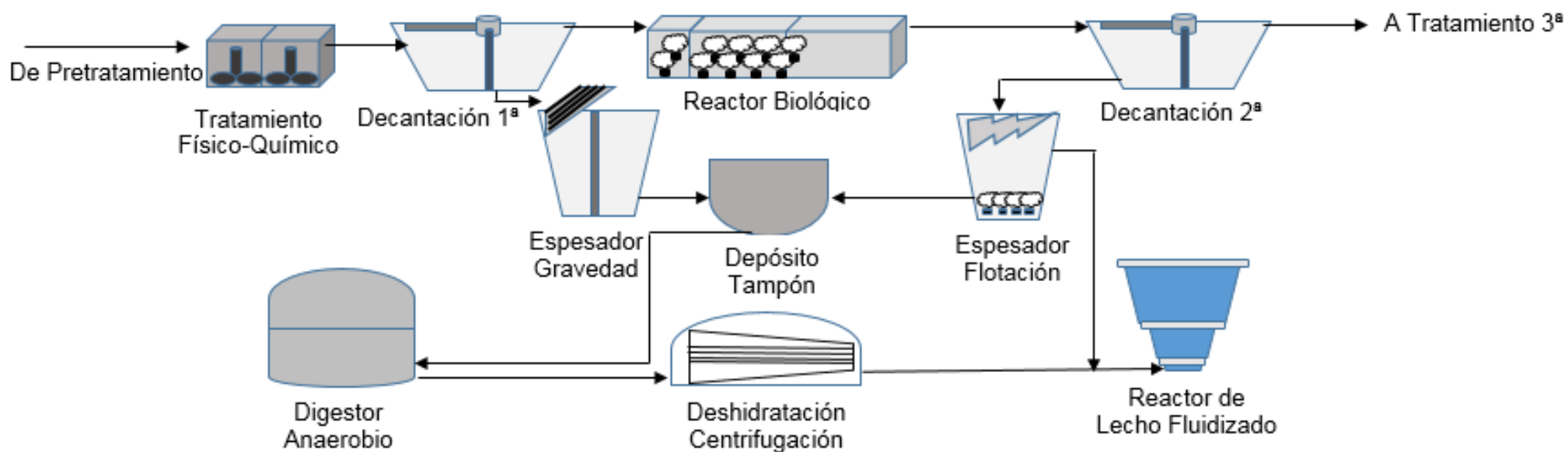
14.- Centro Seccionamiento y Transformación  
 15.- Báscula  
 15.- Productos químicos  
 17.- Sala Calderas

18.- Digestión Anaerobia  
 19.- Gasómetro y Antorcha  
 20.- Planta Producción Estruvita  
 21.- Centro Control e Instalaciones



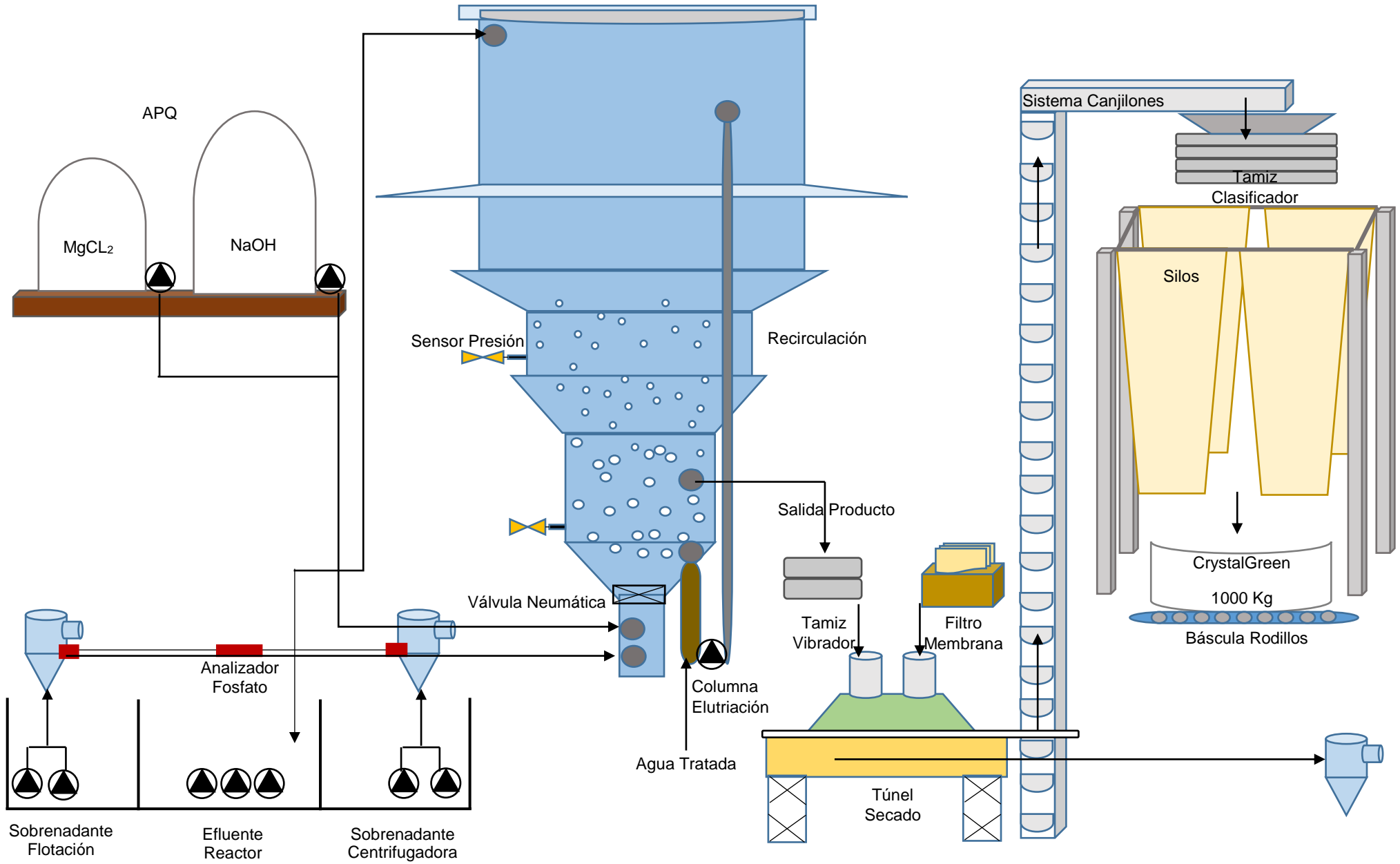
## **ANEXO II**

Diagrama de Flujo de Infraestructuras de una EDAR Convencional donde se Produce la Eliminación de Fósforo.  
Fuente: elaboración propia.



## **ANEXO III**

Diagrama de Flujo de una Planta Tipo Productora de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia.



## **ANEXO IV**



**Visor de la parte intermedia de reactor. Fuente: elaboración propia.**



**Detalle visor de la parte intermedia de reactor. Fuente: elaboración propia.**



**Tamiz vibrante. Fuente: elaboración propia.**



**Sistema de secado de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia.**



**Precipitación natural de estruvita. Fuente: web noticiastecnoagricola.es**



**Sistema de almacenamiento de CrystalGreen. Fuente: elaboración propia.**