

PHOSPHORUS REMOVAL STUDY FOR THE ARAZURI-PAMPLONA WWTP

Sanz Valencia, Mikel; Barat Baviera, Ramón
CALAGUA

Phosphorus is an essential and no-renewable natural resource. From the total phosphorus used in fertilizers manufacturing, about 17% ends in wastewater, creating eutrophication problems.

It is necessary to change the WWTP concept, from "phosphorus removal utility" toward "resource recovery utility". The recovery is only possible in WWTPs with Enhanced Biological Phosphorus Removal System, by some process modifications.

The aim of this study was to design and assess configuration changes in Arazuri-Pamplona WWTP (750,000 equivalent inhabitants) for the phosphorus recovery. The work was carried out using the model BNRM2 and DESASS simulation software.

The used configuration consists on a primary and biological sludge mixing chamber and phosphorous enriched supernatant removal system, either by dynamic thickener or phosphorus recirculation-elutriation system. Compared with more complex systems, this one needs less economic investment, and allows the recovery of 40-50% of total phosphorus before anaerobic digestion, reducing uncontrolled struvite precipitation inside of digesters.

Keywords: Phosphorus recovery; DESASS; EBPR; struvite

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE FÓSFORO EN LA EDAR DE ARAZURI-PAMPLONA

El fósforo es un recurso natural no renovable e imprescindible para la vida. Del total del fósforo utilizado en la fabricación de fertilizantes, aproximadamente el 17% acaba en las aguas residuales, generando problemas de eutrofización en el medio natural.

Es necesario cambiar el concepto de EDAR, de "instalación de eliminación del fósforo como contaminante", hacia "una instalación de recuperación del recurso". Esta recuperación sólo puede realizarse en EDARs con Sistema Biológico de Eliminación de Fósforo, mediante algunas modificaciones en el proceso.

El objetivo de este trabajo ha sido diseñar y valorar las modificaciones en la configuración de la EDAR de Arazuri-Pamplona (750.000 habitantes equivalentes) que permitan recuperar el fósforo. El trabajo se ha llevado a cabo utilizando el modelo BNRM2 y el software de simulación DESASS.

La configuración utilizada consiste en una cámara de mezcla de fango primario y fango biológico y un sistema de extracción de sobrenadante rico en fósforo, ya sea mediante espesador dinámico o recirculación-elutriación de fósforo. Frente a otros sistemas más complejos, este cambio implica una baja inversión y permite la recuperación del 40-50% del fósforo total antes de la Digestión Anaerobia, reduciendo los problemas de precipitación incontrolada de estruvita en los digestores.

Palabras clave: Recuperación de fósforo; DESASS; EBPR; estruvita.

Correspondencia: Mikel Sanz Valencia - mikel.sanzvalencia@gmail.com

Agradecimientos: Agradecimiento al equipo del IIAMA y a mi padre por su apoyo.

1. Introducción

1.1. Descripción de la EDAR de Arazuri-Pamplona

La línea de aguas de la EDAR de Arazuri-Pamplona está formada por un pretratamiento, con rejas gruesas, tamices y sistema de desarenado-desengrasado. Le sigue la decantación primaria, para finalizar con el tratamiento biológico, con eliminación de nutrientes. La purga de los fangos en exceso se hace desde la decantación secundaria. La línea de fangos cuenta con espesadores para el fango primario y flotadores para el fango biológico, además de un sistema de estabilización de fango mediante digestión anaerobia. Los datos básicos de diseño de la planta aparecen en la tabla 1. En los reactores biológicos, el selector supone un 3,844% del volumen total, la zona anóxica el 21,134%, la facultativa el 15,015% y la zona aerobia el 60,007% restante. La zona aerobia está a su vez dividida en 3 zonas con consignas independientes de oxígeno. En el esquema de la figura 2 selector (1), anóxica (2), facultativa (3), óxica1 (4), óxica 2 (5) y óxica 3 (6).

Tabla 1: Parámetros de diseño de la EDAR de Arazuri-Pamplona

	Unidades	Diámetro (m)	Volumen unitario (m ³)
Decantación 1ª	6	39.00	3632.00
Reactor biológico	4	-	17060.40
Decantación 2ª	6	48.00	6333.45
Espesador	3	16.00	660.00
Flotador	2	15.00	590.00
Digestor primario	4	24.40	4150.00
Digestor secundario	1	24.40	4000.00

1.2. Recuperación de fósforo

El fósforo es un recurso limitado, imprescindible e irremplazable como fertilizante. Está por lo tanto ligado a la seguridad alimentaria.

La forma más estable del fósforo es el ión fosfato, lo que hace que prácticamente no aparezca en forma gaseosa en condiciones atmosféricas. El ciclo biogeoquímico del fósforo se desarrolla por lo tanto sobre todo en la corteza terrestre y la hidrosfera, siendo las rocas fosfáticas el reservorio natural de este recurso desde donde pasa al agua debido a procesos de meteorización de las rocas.

Los principales yacimientos de este recurso están formados por estratos de fosforitas sedimentarias de origen marino, aunque existen rocas ígneas ricas en fosfatos. El aprovechamiento de este recurso se basa en la extracción de estos minerales y el posterior procesamiento en la fabricación de productos de uso comercial. Aproximadamente el 80% de la roca fosfática que se extrae en el mundo se utiliza en la fabricación de fertilizantes.

La situación de la Unión Europea dentro del mercado global de roca fosfática muestra aspectos preocupantes que amenazan la seguridad del suministro futuro. La irregular distribución de las reservas mundiales (el 80% están en Marruecos y el Sahara Occidental), la creciente demanda mundial frente a la limitada oferta, las estrategias comerciales de los países productores, la situación geopolítica de estos países y los aspectos técnicos y

medioambientales son los principales factores de preocupación para la Comisión que ya lo ha declarado recurso de relevancia estratégica para la UE.

Se están desarrollando en varios países europeos normativas sobre sostenibilidad y reciclaje de fósforo, pero es muy posible que se extienda al resto mediante aprobación de Directivas. Medidas como por ejemplo la aplicación de estiércol como enmienda orgánica en la agricultura es la vía de recuperación de fósforo más extendida.

Si se tiene en cuenta que de todo el fósforo introducido en el sistema como roca fosfática, aproximadamente el 17% acaba en las aguas residuales, las EDAR pueden convertirse en un lugar inmejorable para la recuperación de este recurso. Una vía de recuperación de fósforo es la aplicación agrícola de los lodos de depuradora (en España cerca del 80% de los lodos generados tienen este destino), aunque esta práctica genera controversia y está restringida por la legislación europea (Directiva 86/278/CEE y modificaciones). En estos países se están investigando diferentes vías para extraer el fósforo mediante el sistema de eliminación biológica de fósforo y su recuperación mediante la cristalización. Aunque se trata de soluciones que no son todavía económicamente viables están en pleno desarrollo.

1.3. La estruvita

En las EDAR con eliminación biológica de nutrientes se favorece el desarrollo de las bacterias PAO, capaces de almacenar intracelularmente el fósforo en condiciones aerobias y trasladarlo desde la línea de aguas hasta la línea de fangos. En anaerobiosis estas bacterias realizan la suelta del fósforo intracelular, y utilizan la energía resultante para almacenar recursos y obtener ventaja competitiva frente al resto de bacterias heterótrofas aerobias.

En las zonas de las EDAR donde se dan ciertas condiciones, ese fósforo puede sufrir procesos de precipitación. En la digestión anaerobia de fangos ocurre este tipo de precipitación, donde los minerales más comunes que precipitan son los fosfatos cálcicos y magnésicos. Entre ellos el más importante es la estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), cuya precipitación incontrolada genera graves problemas en conducciones y bombas (figura 1).

El estudio de la dinámica del fósforo y el conocimiento de los mecanismos de la suelta del fosfato en la línea de fangos, permite mediante un correcto manejo de las condiciones la obtención de corrientes ricas en fósforo, lo que permite la recuperación por cristalización.

Figura 1: Precipitación incontrolada de estruvita



1.4. DESASS

Un modelo matemático es un esquema teórico capaz de expresar el comportamiento de un sistema o una realidad mediante expresiones matemáticas. La modelación matemática de sistemas de depuración de aguas permite analizar la realidad y realizar predicciones en este campo.

En el campo del tratamiento de aguas residuales se han desarrollado muchos modelos desde mediados del siglo XX hasta ahora. Existen modelos individuales para cada uno de los sistemas de tratamiento, como los modelos de fangos activados, los de digestión anaerobia o los de sedimentación. Existen también modelos globales que contemplan al mismo tiempo todas las unidades de tratamiento.

El análisis de una EDAR completa, se puede realizar utilizando distintos modelos conectados entre sí, o se puede realizar utilizando un único modelo global. En un modelo global se tienen en cuenta todos los procesos en todo momento, y son las condiciones de operación y no el modelo, las que determinan la ocurrencia o no de cada uno de los procesos.

DESASS (Ferrer, y otros, 2008) es un simulador utilizado para modelar el funcionamiento completo de una EDAR, tanto la línea de aguas como la línea de fangos. Tiene implementados algoritmos de cálculo basados en el modelo global BRNM2 (Seco, Ribes, Serralta, & Ferrer, 2004) y el modelo químico MINTEQA2 para el cálculo de los procesos gobernados por el equilibrio (Allison, Brown, & Novo-Gradac, 1991). DESASS permite realizar simulaciones de diferentes configuraciones de planta, fijando las unidades de tratamiento, los caudales y la calidad del influente. Simula tanto los procesos físicos de sedimentación, como los procesos biológicos que se dan en los sedimentos de los decantadores y espesadores. Puede representar gráficamente la evolución de las variables de proceso. Permite hacer un análisis de resultados para regímenes estacionarios o realizar análisis en estado transitorio.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo ha sido, definir y valorar mediante simulación una alternativa viable que permita la obtención de una corriente suficientemente rica en fósforo, para la recuperación en un cristalizador. Todo ello bajo los condicionantes de la EDAR de Arazuri-Pamplona.

3. Metodología

3.1. Caracterización de la agua de entrada

El simulador DESASS para poder aplicar una resolución del modelo matemático BNRM2 necesita una serie de relaciones en forma de ecuación y unas condiciones de contorno. Las ecuaciones están definidas por el modelo y por las leyes de continuidad. Las condiciones de contorno necesarias se proveen mediante la caracterización del caudal influente a la EDAR y la definición de los elementos del modelo.

La caracterización del agua influente ha presentado una amplia problemática. El simulador DESASS no simula el pretratamiento, donde se elimina una cierta cantidad de sólidos en los tamices y el desarenado. Además los muestreos realizados en la EDAR son en la mayoría de los casos puntuales y no recogen las variaciones intradía. Además los parámetros medidos en la EDAR usualmente no son los que se requieren para el simulador. Por ello se han realizado analíticas específicas estandarizadas (Association, American Public Health; Association, American Water Works; Federation, Water Environment, 1998). para realizar

este trabajo, con las que se han establecido relaciones y aproximaciones que han permitido alcanzar una buena correlación entre los parámetros medidos analíticamente en la EDAR y los resultados obtenidos por simulación.

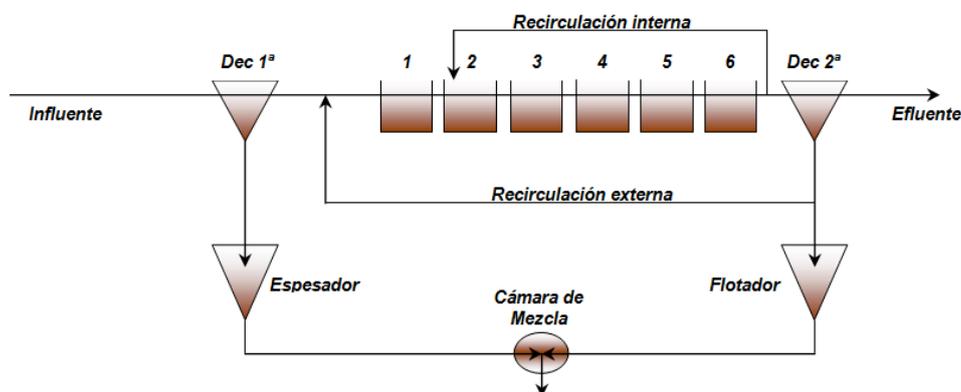
Tabla 2: Caracterización de agua influente para DESASS.

Agua de entrada					
DQO (mgDQO/l)	589.8	DQO _{SOL} (mgDQO/l)	260.7	AGV (mgHAc/l)	105.6
DBO _L (mgDQO/l)	456.7	DBO _{L,SOL} (mgDQO/l)	214.6	pH	7.5
SS (mgSS/l)	199.4	SS _{VOL} (mgSS/l)	190.8	T ^a	16.6
P _T (mgP/l)	5.8	P _{SOL} (mgP/l)	3.9	PO ₄ (mgP/l)	2.9
N _T (mgN/l)	46.2	N _{SOL} (mgN/l)	38.8	NH ₄ (mgN/l)	28.1

3.2. Modelo base

El modelo base debe ser capaz de obtener por simulación resultados similares a los obtenidos analíticamente en la EDAR. Para el desarrollo del modelo sólo se han incluido los elementos que aparecen en la figura 2, ya que el estudio se centra en las corrientes previas a la digestión de los fangos.

Figura 2: Esquema del Modelo Base utilizado en DESASS.



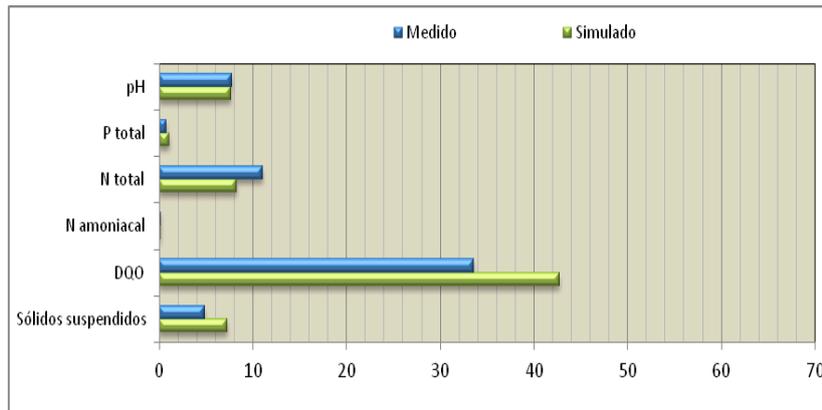
3.3. Calibración del modelo

Existen varios métodos para calibrar un modelo matemático (Durán, 2013). En este caso el modelo se ha calibrado utilizando los datos históricos promediados, obtenidos durante una fase estacionaria de funcionamiento de la EDAR (periodo elegido: 1 de junio a 15 de agosto de 2014), asociando estos datos con los parámetros obtenidos por simulación (figura 3). De los datos históricos se han eliminado los días con lluvia intensas.

En la fase de análisis se han corregido los datos en base a la continuidad tanto de caudales como de sólidos, dado que existen incongruencias debidas a la inexactitud de los caudalímetros y la inadecuada técnica de muestreo. Se ha realizado una corrección sobre la fracción particulada del agua influente, ya que el simulador no es capaz de simular el pretratamiento donde se da una cierta eliminación de sólidos.

La calibración de sistemas estacionarios puede completarse mediante calibración off-shore, mediante ensayos bajo condiciones controladas en los que se analizan parámetros de especial interés, que permitan realizar correcciones sobre el modelo base.

Figura 3: Comparativa de resultados en Efluente.

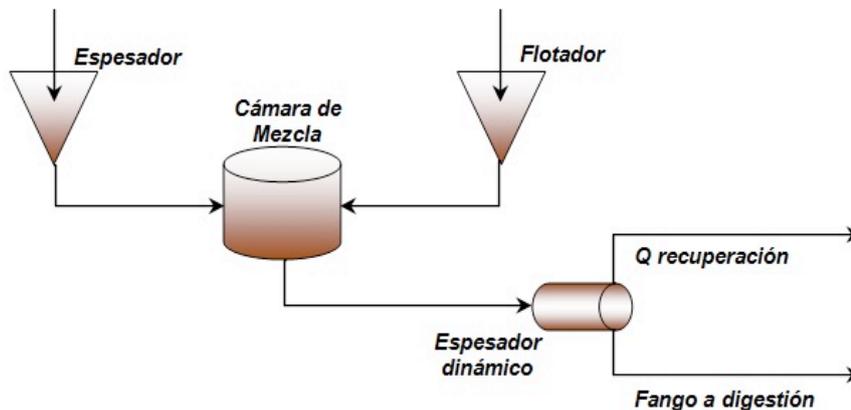


3.4. Diseño de alternativas

Se han valorado tres posibles alternativas para extraer corrientes concentradas en fósforo previas a la digestión. En todos ellos, se ha utilizado como volumen de referencia para la cámara de mezcla un espesador vacío que existe en la EDAR.

Opción 1: Se basa en una cámara de mezcla de fangos en la que las bacterias PAO liberan el fosfato intracelular, seguida de un espesador dinámico en el que se realiza el espesado de los fangos que se envían a digestión y se obtiene además una corriente de rechazo concentrada en fósforo. Los factores determinantes son el tiempo de contacto en la cámara de mezcla, la concentración de fosfato y acético y las reservas intracelulares de polifosfatos y polihidroxialcanoatos (PHA) de las bacterias PAO, así como el caudal de rechazo de la fase acuosa proveniente del espesador dinámico.

Figura 4: Esquema de la Opción 1 utilizada en DESASS

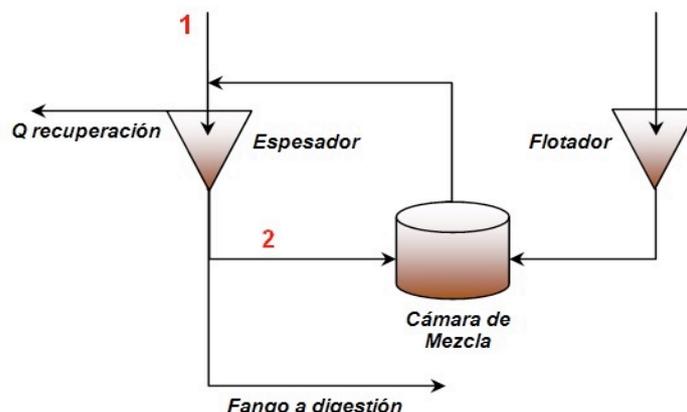


Opción 2: Utiliza el mismo principio en la cámara de mezcla para la suelta de fósforo, sin embargo la extracción del fósforo se realiza mediante elutriación del fango en los espesadores primarios. En esta opción se estudian dos variables con tres series de simulaciones:

- Caudal de fango primario: el caudal de fango primario influye en el caudal de rechazo de espesadores. A su vez el caudal de rechazo influye sobre la concentración del fosfato elutriado.

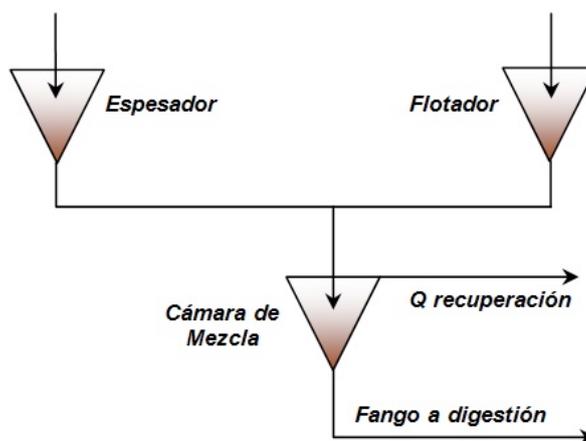
- Caudal de elutriación: para un caudal fijo de fango primario, el caudal elutriado influye en la cantidad de fosfato elutriado. Se han realizado dos series de ensayos, la primera de ellas fijando el caudal de fango primario en un valor normal de operación en la EDAR y la segunda con un caudal bajo de fango primario.

Figura 5: Esquema de la Opción 2 utilizada en DESASS



Opción 3: dado que la cámara de mezcla simulada está basada en un espesador y que la función de un espesador no es otra que la separación de la fase líquida y la fase sólida, en esta opción se estudia la posibilidad de elutriar el fosfato liberado en el propio espesador.

Figura 6: Esquema de la Opción 3 utilizada en DESASS



4. Resultados

Los resultados de este trabajo se dan en base a la corriente de recuperación de fósforo y en base al fósforo que se envía a la Digestión Anaerobia de fangos, causante del problema de precipitación de estruvita. En la corriente de recuperación son de interés el caudal (Q_{RECUP}) y la concentración de fosfato (S_{PO_4}). En la corriente de fango a digestión, el caudal (Q_{DIG}), la concentración de sólidos (X_{SST}) y la concentración de fósforo total (P_T). Además, también son de interés, tanto para la entrada como para la salida de la cámara de contacto, los niveles de acético (S_A), fosfato libre (S_{PO_4}) y las reservas intracelulares de polifosfatos (X_{PP}) y poli-hidroxi-alcanoatos (X_{PHA}) de las bacterias PAO. Estos parámetros nos permiten comprobar la eficacia de la cámara de mezcla y saber si se ha liberado completamente el fósforo intracelular, o si existe el sustrato suficiente para liberarlo.

4.1. Resultados Opción 1

Se ha realizado una serie de 6 simulaciones en las que la variable ha sido la concentración de fangos enviados a digestión. En todas las repeticiones el tiempo de retención (TRH) en la cámara de contacto es de 1,7 días.

Como muestran los resultados en la tabla 3 la corriente de recuperación tiene en todos los ensayos la misma concentración de fosfato, pero su caudal aumenta cuanto más se concentra el fango enviado a digestión, además de que la eliminación neta de fósforo es también mayor.

Se observa en la tabla 4 que todavía quedan reservas intracelulares de polifosfato X_{PP} , pero que el sustrato S_A se ha consumido por completo. Esta alternativa puede ser optimizada para incorporar más sustrato en la cámara de mezcla y posibilitar así la liberación de todas las reservas de fosfato.

Tabla 3: Resultados obtenidos en las simulaciones de la Opción 1

Rep.	Q_{DIG} (m ³ /día)	X_{SST} (%MS)	P_T (mgP/l)	Q_{RECUP} (m ³ /día)	S_{PO4} (mgP/l)	Reducción P_T a Digestión
1	280.06	4.5	1079.94	92.97	382.80	12.13%
2	251.94	5.0	1151.70	121.09	382.80	15.70%
3	228.95	5.5	1223.47	144.07	382.79	18.62%
4	209.81	6.0	1295.24	163.22	382.79	21.05%
5	193.62	6.5	1367.01	179.41	382.79	23.11%
6	179.75	7.0	1438.78	193.28	382.79	24.87%

Tabla 4: Parámetros de control en la cámara de mezcla en la Opción 1

Parámetro	Unidades	Entrada	Salida
S_A	(mgDQO/l)	42.60	0.72
S_{PO4}	(mgP/l)	89.34	382.80
X_{PP}	(mgP/l)	324.60	83.38
X_{PHA}	(mgDQO/l)	0.05	384.96

4.2. Resultados Opción 2

En esta Opción existen dos variables, el caudal de fango primario (Q_{PRI}) enviado a la línea de fangos y el caudal de elutriación (Q_{ELUT}).

Para valorar la primera de ellas se han realizado 11 simulaciones. En las simulaciones se ha mantenido constante el caudal de fango a digestión y el caudal de entrada a la cámara de mezcla.

Los resultados obtenidos (tabla 5) muestran la reducción del caudal de fango primario implica una reducción en el caudal de rechazo del espesado y un aumento en la concentración de los sólidos del caudal que va a digestión. Con la reducción en la corriente de recuperación la concentración de fosfato aumenta. Aunque mejora la concentración de fosfato, la eficacia del sistema para reducir el fósforo total que va a digestión pierde eficacia.

En la tabla 6 se aprecia el efecto que la modificación del caudal de fango primario tiene sobre la eficacia de la cámara de mezcla. En la mayoría de repeticiones la liberación de

fosfato se podría considerar completa, salvo con caudales bajos de fango primario, donde la suelta de fósforo no es completa, probablemente porque el sustrato disponible es escaso.

Tabla 5: Resultados obtenidos en las simulaciones de la Opción 2a

Rep.	Q _{PRI} (m ³ /día)	X _{SST} (mgSST/l)	Q _{RECUP} (m ³ /día)	S _{PO4} (mgP/l)	Q _{DIG} (m ³ /día)	P _T (mgP/l)	Reducción P _T a Digestión
1a	4531.9	1355.06	4388.4	41.14	372.4	434.64	52.98%
2a	4154.2	1467.74	4010.7	44.72	372.2	438.44	52.59%
3a	3776.6	1600.98	3634.6	49.08	370.9	445.23	52.02%
4a	3398.9	1765.76	3253.4	54.06	374.2	446.72	51.43%
5a	3021.2	1969.87	2877.4	60.62	372.8	456.05	50.61%
6a	2643.6	2234.54	2498.6	68.51	373.6	463.34	49.70%
7a	2265.9	2586.36	2121.9	78.95	372.6	475.72	48.51%
8a	1888.3	3076.95	1743.4	91.20	373.5	498.21	45.94%
9a	1510.6	3845.76	1366.9	111.44	372.7	522.17	43.46%
10a	1133.0	5048.77	988.9	145.19	372.6	548.76	40.59%
11a	377.7	14480.94	233.5	322.36	373.0	751.50	18.58%

Tabla 6: Parámetros de control en la cámara de mezcla en la Opción 2a

Rep.	Q _{PRI} (m ³ /día)	Q _{ELUT} (m ³ /día)	S _A (mgDQO/l)	S _{PO4} (mgP/l)	X _{PP} (mgP/l)	X _{PHA} (mgDQO/l)
1a	4531.9	248.6	53.86	739.2	1.9	821.45
2a	4154.2	248.3	49.16	743.4	2.0	825.55
3a	3776.6	248.5	43.12	751.3	2.0	835.57
4a	3398.9	248.4	38.26	754.2	2.1	837.94
5a	3021.2	248.5	33.65	762.4	2.1	847.89
6a	2643.6	248.4	29.03	766.8	2.2	851.83
7a	2265.9	248.2	26.31	772.5	2.3	857.28
8a	1888.3	248.3	19.21	762.4	2.5	852.82
9a	1510.6	248.6	11.84	770.4	2.9	860.96
10a	1133.0	248.2	10.83	794.0	3.0	876.14
11a	377.7	248.5	1.31	807.0	18.2	855.75

Para estudiar el efecto que tiene la segunda variable (Q_{ELUT}) se tiene que fijar un caudal de fango primario y tener en cuenta que el caudal unitario máximo de extracción en los 2 espesadores operados es de 576 m³/día. Aunque por su baja relevancia no se muestran, en el trabajo se han realizado ensayos con caudales de extracción superiores para comprobar el comportamiento del sistema y valorar los resultados.

Tabla 7: Resultados obtenidos en las simulaciones de la Opción 2b

Rep.	Q _{PRI} (m ³ /día)	Q _{ELUT} (m ³ /día)	Q _{RECUP} (m ³ /día)	S _{PO4} (mgP/día)	Q _{DIG} (m ³ /día)	P _T (mgP/día)	Reducción P _T a Digestión
------	---	--	---	-------------------------------	---	-----------------------------	---

1b	1888.3	19.7	1743.4	91.20	373.5	498.22	45.94%
2b	1888.3	36.8	1744.5	91.03	372.4	499.24	45.99%
3b	1888.3	50.7	1744.9	90.89	372.0	499.63	46.01%
4b	1888.3	65.5	1745.9	90.77	371.0	500.59	46.05%
5b	1888.3	209.4	1744.7	90.00	372.2	499.10	46.03%
6b	1888.3	373.6	1743.3	89.66	373.6	495.84	46.19%
7b	1888.3	562.7	1741.7	89.50	375.1	492.42	46.33%
8b	1888.3	791.1	1745.2	90.11	372.3	494.02	46.57%
9b	1888.3	1057.1	1746.0	90.20	371.4	492.60	46.85%

Tabla 8: Resultados obtenidos en las simulaciones de la Opción 2c

Rep.	Q _{PRI} (m ³ /día)	Q _{ELUT} (m ³ /día)	Q _{RECUP} (m ³ /día)	S _{PO4} (mgP/día)	Q _{DIG} (m ³ /día)	P _T (mgP/día)	Reducción P _T a Digestión
1c	377.65	10.14	411.92	309.50	192.74	1122.69	37.14%
2c	377.65	21.93	407.28	307.82	197.38	1105.75	36.60%
3c	377.65	33.50	414.81	307.39	189.85	1134.67	37.42%
4c	377.65	48.32	411.38	307.07	193.28	1119.68	37.13%
5c	377.65	65.32	408.69	307.27	195.97	1107.16	36.97%
6c	377.65	82.45	412.27	308.14	192.39	1117.97	37.51%
7c	377.65	104.20	411.14	309.99	193.52	1107.98	37.71%
8c	377.65	129.15	410.93	311.87	193.73	1101.78	37.99%
9c	377.65	157.84	411.75	314.27	192.91	1098.33	38.45%
10c	377.65	196.21	408.45	316.23	196.21	1080.51	38.41%
11c	377.65	235.73	411.79	319.70	192.87	1083.85	39.27%
12c	377.65	289.81	411.46	322.54	193.21	1074.96	39.66%
13c	377.65	355.88	413.03	324.90	191.63	1073.76	40.22%
14c	377.65	450.59	411.55	324.64	193.11	1068.31	40.07%
15c	377.65	575.16	412.94	326.29	191.72	1066.14	40.62%
16c	377.65	769.57	412.27	326.68	192.39	1060.59	40.72%
17c	377.65	1103.42	409.94	326.91	194.72	1049.66	40.62%

En este estudio se han elegido dos posibles caudales de fango primario. El primero es el actual caudal de fango primario de operación en la EDAR y el segundo un caudal más bajo. Con el primero se han realizado 17 simulaciones de las que sólo se muestran las 9 primeras que son operativamente viables en la EDAR, mientras que con el segundo se han realizado 19, aunque sólo se muestran las 17 primeras. En ambos ensayos, la variable es la fracción de caudal recirculado hacia la cámara de mezcla. Estos ensayos se han configurado manteniendo fijo el caudal de entrada a digestión, modificando para ello el caudal elutriado y el caudal de extracción de fango espesado.

Las simulaciones de la primera serie (tabla 7) muestran que para los diferentes caudales de elutriación se obtienen concentraciones de fosfato similares en la corriente de recuperación y que la variación en la reducción de fósforo en el fango a digestión es muy pequeña. Los

resultados obtenidos para la segunda serie (tabla 8) muestran mayor variación, aunque muy ligera. Conforme el caudal de elutriación aumenta, también lo hace la concentración de fosfato en la corriente de recuperación, lo que implica una mejora también en la reducción del fósforo total que va a digestión.

Aunque previsiblemente el aumento de caudal de recirculación incrementa la carga en los espesadores, el análisis de los perfiles de concentración de sólidos (X_{SST}) revela que el manto de fango se mantiene parecido en todas las simulaciones (figura 7). Esto es debido a que el aumento de carga es compensado por el aumento en la extracción de fango espesado en el fondo de los espesadores.

Figura 7: Perfil de X_{SST} en los espesadores para la Opción 2b

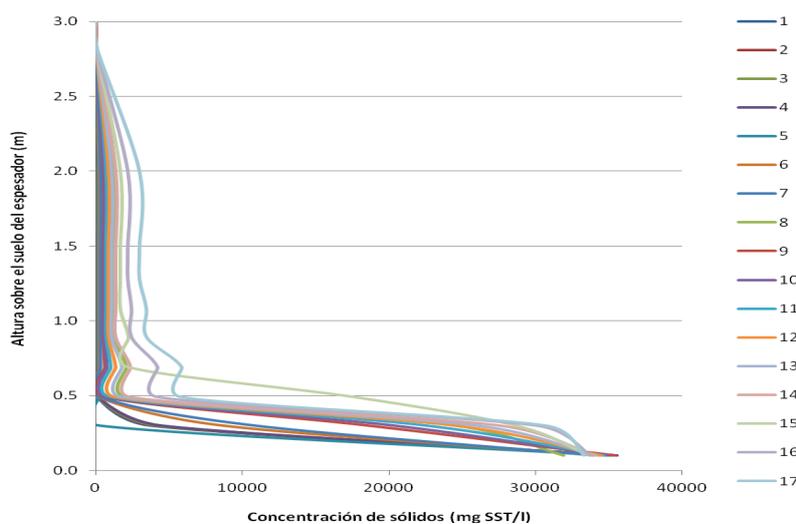


Tabla 9: Parámetros de control en la cámara de mezcla en la Opción 2b

Rep.	Q_{ELUT} ($m^3/día$)	TRH (horas)	S_A ($mgDQO/l$)	S_{PO4} (mgP/l)	X_{PP} (mgP/l)	X_{PHA} ($mgDQO/l$)
1b	248.3	58.0	19.22	762.38	2.48	852.82
2b	265.4	54.2	30.91	717.52	2.25	839.23
3b	279.3	51.6	41.27	685.34	2.15	829.12
4b	294.1	49.0	52.73	654.60	2.09	819.36
5b	438.0	32.9	146.85	465.10	1.96	754.39
6b	602.2	23.9	226.09	361.28	1.94	712.10
7b	791.3	18.2	282.29	295.65	1.94	683.58
8b	1020.3	14.1	329.18	250.98	1.95	669.54
9b	1286.3	11.2	365.54	217.82	1.95	654.51

La eficacia de la cámara de mezcla varía mucho en función del caudal de recirculación, ya que varía el TRH en la cámara de mezcla. En los parámetros observados en la cámara de mezcla para la primera serie de simulaciones (tabla 9) y también para la segunda (tabla 10), se observa que para TRH altos la disponibilidad de sustrato (S_A) es baja y que hay más sustrato disponible cuanto más se reduce el TRH (aumento de Q_{ELUT}). También se observa que la concentración de fosfato a la salida de la cámara se diluye cuando aumenta el Q_{ELUT} . Aunque en la primera serie de simulaciones se puede considerar una liberación completa de

las reservas intracelulares de polifosfato, en la segunda serie se observa que no ocurre así para Q_{ELUT} bajos. Este comportamiento se explica por la baja disponibilidad de sustrato (S_A).

Tabla 10: Parámetros de control en la cámara de mezcla en la Opción 2c

Rep.	Q_{ELUT} (m ³ /día)	TRH (horas)	S_A (mgDQO/l)	S_{PO4} (mgP/l)	X_{PP} (mgP/l)	X_{PHA} (mgDQO/l)
1c	237.15	60.7	0.85	795.73	40.90	797.91
2c	248.94	57.8	0.81	768.27	45.62	785.83
3c	260.51	55.3	0.79	746.63	47.83	782.52
4c	275.33	52.3	0.77	722.08	49.09	778.85
5c	292.33	49.3	0.77	698.28	48.90	778.33
6c	309.46	46.5	0.77	678.49	47.49	786.03
7c	331.21	43.5	0.80	658.09	43.30	793.05
8c	356.16	40.4	0.84	637.49	38.88	803.32
9c	384.84	37.4	0.90	617.89	33.18	817.18
10c	423.22	34.0	0.98	593.99	27.67	826.64
11c	462.73	31.1	1.20	576.73	19.23	848.98
12c	516.81	27.9	1.72	555.09	11.41	865.97
13c	582.89	24.7	3.85	533.19	5.21	880.77
14c	677.60	21.3	5.63	503.71	4.02	896.58
15c	802.17	18.0	14.71	478.42	2.67	880.82
16c	996.57	14.4	22.75	449.17	2.38	876.55
17c	1330.43	10.8	31.57	418.54	2.23	867.88

4.3. Resultados Opción 3

Esta última opción, en la que la cámara de mezcla tiene además la función de separar las fases líquida y sólida para extraer el fósforo, ha obtenido como resultado la imposibilidad operativa de utilizar esta configuración. La introducción de todos los fangos primarios y biológicos espesados produce la sobrecarga del espesador, que es incapaz de separar las fases, incluso sin caudal de elutriación. El perfil de sólidos muestra que el manto de fango rebosa.

5. Conclusiones

Las principales justificaciones de este trabajo son: primero, la necesidad de eliminar del agua residual los nutrientes en general y el fósforo en particular, para evitar la eutrofización del medio receptor; segundo, la necesidad de recuperar el fósforo debido a su carácter no renovable y a la escasez del recurso; y tercero, extraer el fósforo antes de la digestión anaerobia debido a los problemas generados por la precipitación incontrolada de estruvita.

El objetivo de este trabajo ha sido el de definir y valorar alternativas para extraer el fósforo del fango en un punto de la línea de fangos anterior a la digestión anaerobia de fangos, utilizando como herramienta el simulador DESASS.

La comprensión del funcionamiento de las bacterias PAO y el correcto manejo de las diferentes corrientes pueden utilizarse para alcanzar el objetivo de este trabajo, evitando que

una parte importante del fósforo alcance la digestión. La premisa de hacer más versátiles los elementos disponibles en la EDAR de Arazuri, hace que un espesador actualmente en desuso pueda ser utilizado como parte de las opciones estudiadas, reduciendo la inversión inicial necesaria en una futura aplicación.

La primera alternativa consiste en utilizar este espesador como volumen de contacto (cámara de mezcla) para la suelta de fósforo y posteriormente extraer mediante un espesador dinámico una corriente de rechazo rica en fósforo. Esta alternativa tiene como ventaja una corriente muy concentrada en fósforo, con lo que las dimensiones del cristalizador posterior se reducen. Además la solución es bastante robusta y operativamente bastante sencilla. Entre los inconvenientes están la concentración de sólidos máxima que acepta la digestión. También el coste económico de la instalación del espesador dinámico. Además el espesador dinámico utiliza aditivos para mejorar la calidad del fango espesado y estos aditivos pueden afectar a la cristalización del fósforo en el cristalizador.

En la segunda el fósforo es extraído mediante elutriación en el rechazo de los espesadores. Se han estudiado las dos variables principales que afectan al proceso en esta configuración: el caudal de fango primario y el caudal elutriado. El caudal de fango primario, afecta directamente al nivel de dilución de la corriente de recuperación. La segunda variable, el caudal de recirculación muestra en los resultados diferencias poco relevantes. Por lo tanto la variable determinante es el caudal de fango primario introducido en el sistema.

6. Referencias

Artículos de revistas

- Ferrer, J., Seco, A., Serralta, J., Ribes, J., Manga, J., Asensi, E., y otros. (2008). DESASS: A software tool for designing, simulating and optimizing WWTPs. *Environmental Modelling & Software*.23. 19-26.
- Seco, A., Ribes, J., Serralta, J., & Ferrer, J. (2004). Biological Nutrient Removal Model No.1, BNRM1. *Water Science and Technology*. 50 (6). 69-78.

Libros

- Association, American Public Health; Association, American Water Works; Federation, Water Environment. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Edition*. Washington, D. C.: Lenore S. Clesceri; Arnold E. Greenberg; Andrew D. Eaton.

Publicaciones del Gobierno

- Allison, J. D., Brown, D. S., & Novo-Gradac, K. (1991). MINTEQA2/PRODEFA2 A geochemical assessment model for environmental systems: Version 3.0 Users manual. *EPA/600/3-91/021* (pág. 107). Washington, D. C.: USEPA.

Tesis Doctoral

- Durán, F. (Diciembre de 2013). Modelación matemática del tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas incluyendo las bacterias sulfatorreductoras. Aplicación a un biorreactor anaerobio de membranas. (*Tesis Doctoral* . Universitat Politècnica de València). Obtenido de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/34778>