



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora  
de aguas residuales Sa Pobla por simulación mediante el  
software DESASS

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

AUTOR/A: Martínez Valero, Enrique

Tutor/a: Barat Baviera, Ramón

Cotutor/a: Serralta Sevilla, Joaquín

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Universitat Politècnica de València

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES SA POBLA POR SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE DESASS

Máster en Ingeniería Ambiental

**AUTOR:** ENRIQUE MARTÍNEZ VALERO

**TUTOR:** Dr. RAMÓN BARAT BAVIERA

**COTUTOR:** Dr. JOAQUÍN SERRALTA SEVILLA

Valencia, septiembre de 2022



Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Sa Pobla por simulación mediante el software DESASS





## RESUMEN

De entre los objetivos de la Agenda 2030 sobre Desarrollo Sostenible aprobados en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas, destaca el ODS 6, “Agua limpia y saneamiento”, de garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible y saneamiento para todos.

En julio de 2018, el tribunal de Justicia de la Unión Europea condenó a España a pagar una multa por incumplimientos reiterados de la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas en 9 municipios de más de 15.000 h-e. Por ello, en octubre de 2018, el Gobierno de España redactó el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR). El objetivo de este plan es revisar las estrategias de intervención definidas en los planes hidrológicos para priorizar aquellas medidas por las que fue condenado y garantizar una gestión sostenible basada en el ciclo integral del agua, considerando el potencial de las aguas residuales para avanzar en la economía circular.

El principal objetivo de este trabajo es el estudio del diseño de la ampliación y mejora de la depuradora de Sa Pobra (Mallorca), una de las medidas contempladas el Plan DSEAR. Esta EDAR recibe actualmente un caudal superior al que puede tratar, lo que ha provocado vertidos en s'Albufera, un Parque Natural cercano.

Se ha caracterizado el agua de entrada a la EDAR a partir de datos recogidos en los últimos años y se han propuesto tres alternativas diferentes: oxidación total con eliminación biológica de fósforo (alternativa 1), tratamiento convencional de fangos activos con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química (alternativa 2) y oxidación total con eliminación de fósforo por precipitación química (alternativa 3).

Para escoger la alternativa óptima, se ha realizado una valoración tanto técnica como económica. Se ha optado por la herramienta de simulación DESASS para la valoración técnica de todas las alternativas. Posteriormente se ha realizado un análisis económico calculando aproximadamente los costes de inversión y explotación para cada una de las alternativas.

Los resultados del estudio de diseño de la EDAR Sa Pobra, tras la comparación técnica y económica de todas las alternativas, han demostrado que la alternativa óptima corresponde al tratamiento convencional de fangos activados con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química (alternativa 2), con un coste de **0,29 €/m<sup>3</sup>** de agua residual tratada.

**Palabras clave:** Plan DSEAR, EDAR, DESASS, fangos activados, eliminación de nutrientes.



## RESUM

Entre els objectius de l'Agenda 2030 sobre Desenvolupament Sostenible aprovats en 2015 per l'Organització de les Nacions Unides destaca l'ODS 6, "Aigua neta i sanejament", la missió del qual és garantir la disponibilitat i la gestió sostenible de l'aigua i sanejament per a tots.

Al juliol de 2018, el Tribunal de Justícia de la Unió Europea va condemnar a Espanya a pagar una multa per incompliments reiterats de la Directiva 91/271/CEE sobre el tractament de les aigües residuals urbanes en 9 municipis de més de 15.000 h-e. Per això, a l'octubre de 2018, el Govern d'Espanya va redactar el Pla Nacional de Depuració, Sanejament, Eficiència, Estalviament y Reutilització (Pla DSEER). L'objectiu d'aquest pla és revisar les estratègies d'intervenció definides als plans hidrològics per a prioritzar aquelles mesures per les quals va ser condemnat i garantir una gestió sostenible basada en el cicle integral de l'aigua, considerant el potencial de les aigües residuals per avançar en l'economia circular.

El principal objectiu d'aquest treball és l'estudi del disseny de l'ampliació i millora de la depuradora de Sa Pobra (Mallorca), una de les mesures contemplades al Pla DSEAR. Aquesta EDAR rep actualment un cabdal superior al que pot tractar, situació que ha provocat abocaments en s'Albufera, un Parc Natural proper.

S'ha caracteritzat l'aigua d'entrada a l'EDAR a partir de dades recollides els últims anys i s'han proposat tres alternatives diferents: oxidació total amb eliminació biològica de fòsfor (alternativa 1), tractament convencional de fangs actius amb digestió aeròbia de fangs i eliminació de fòsfor per precipitació química (alternativa 2) i oxidació total amb eliminació de fòsfor per precipitació química (alternativa 3).

Per a escollir l'alternativa òptima, s'ha realitzat una valoració tant tècnica com econòmica. S'ha optat per la ferramenta de simulació DESASS per a la valoració tècnica de totes les alternatives. Posteriorment s'ha realitzat una anàlisi econòmica calculant aproximadament els costos d'inversió i explotació per a cadascuna de les alternatives.

Els resultats de l'estudi de disseny de l'EDAR Sa Pobra, després de la comparació tècnica i econòmica de totes les alternatives, han demostrat que l'alternativa òptima correspon al tractament convencional de fangs actius amb digestió aeròbia de fangs i eliminació de fòsfor per precipitació química (alternativa 2), amb un cost de **0,29 €/m<sup>3</sup>** d'aigua residual tractada.

**Paraules clau:** Pla DSEER, EDAR, DESASS, fangs actius, eliminació de nutrients.



## ABSTRACT

From all the objectives of the 2030 Agenda for Sustainable Development approved in 2015 by the United Nations, SDG 6 “Clean Water and Sanitation”, to ensure water availability and a its sustainable management and sanitation for everyone, should be highlighted.

On July 2018, the Court of Justice of the European Union condemned Spain to pay a penalty for repeated non-compliance with Directive 91/271/EEC on urban wastewater treatment in 9 municipalities of more than 15.000 e.i. Thus, in October 2018, the Spanish Government drafted a National Wastewater Treatment, Sanitation, Efficiency, Savings and Reuse ( WTSESR Plan). The plan’s objective is to look over the intervention strategies defined in the hydrological plans to prioritize the measures it was condemned for and to guarantee a sustainable management based on the integral water cycle, considering wastewaters’ potential to advance the circular economy.

This work’s main objective is the design study of the expansion and improvement of the wastewater treatment plant of Sa Pobra (Mallorca), one of the measurements considered in WTSESR Plan. This WWTP is currently receiving a bigger incoming water flow than what it’s capable to treat, causing discharges on s’Albufera, a nearby Natural Park.

The incoming water to the WWTP has been characterized from de data collected on recent years and three different design alternatives have been proposed: total oxidation with biological elimination of phosphorus (alternative 1), conventional activated sludge treatment with aerobic digestion of sludge and chemical precipitation of phosphorous (alternative 2) and total oxidation chemical precipitation of phosphorous (alternative 3).

To choose the best design, all alternatives have been evaluated both technically and economically. The simulation software DESASS has been chosen to carry on the technical evaluation of all the alternatives. Afterwards, the economical evaluation has been made by roughly estimating the investment and operation expenses for each alternative.

After both the technical and economical comparison between all the alternatives, the results of the Sa Pobra WWTP design study have shown that the optimal alternative corresponds to the conventional activated sludge treatment with aerobic digestion of sludge and chemical precipitation of phosphorous (alternative 2), with an estimated cost of **0,29 €/m<sup>3</sup>** of treated wastewater.

**Keywords:** DSEAR Plan, WWTP, DESASS, activated sludge, nutrient removal.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1. Agua y Desarrollo Sostenible.....	8
1.2. Tratamiento de aguas residuales.....	9
1.2.1. Procesos de oxidación total.....	11
1.2.2. Eliminación de nutrientes.....	11
1.3. Marco Legislativo.....	13
1.3.1. Normativa europea.....	13
1.3.2. Normativa estatal.....	15
1.3.3. Normativa autonómica.....	16
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EDAR SA POBLA.....</b>	<b>18</b>
3.1. Ubicación de la EDAR Sa Pobra.....	18
3.2. Evolución histórica de la EDAR Sa Pobra.....	21
3.3. Problemática actual.....	24
<b>4. CARACTERIZACIÓN DEL INFLUENTE.....</b>	<b>25</b>
4.1. Caudal.....	26
4.2. Temperatura.....	26
4.3. Demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno y sólidos suspendidos...27	
4.4. Nitrógeno total, amonio y nitratos.....	30
4.5. Fósforo total y ortofosfatos.....	31
4.6. Caracterización completa del agua residual.....	33
4.7. Límites de vertido.....	37
<b>5. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO PROPUESTAS PARA LA EDAR SA POBLA.....</b>	<b>38</b>
5.1. ALTERNATIVA 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo.....	38
5.2. ALTERNATIVA 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo.....	39
5.3. ALTERNATIVA 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo.....	39
<b>6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....</b>	<b>41</b>
6.1. Diseño del pretratamiento.....	41
6.2. Resultados simulación alternativa 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo.....	44
6.3. Resultados simulación alternativa 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo.....	46
6.4. 6.4. Resultados simulación alternativa 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo.....	49
6.5. Diseño del tratamiento de desinfección.....	51
6.6. Comparación de las alternativas.....	52
<b>7. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS.....</b>	<b>54</b>
7.1. Costes de construcción.....	54
7.1.1. Coste de obra civil.....	54
7.1.2. Coste de adquisición de equipos.....	55
7.1.3. Costes totales de construcción.....	55
7.2. Costes de explotación.....	57
7.2.1. Coste de gestión de fangos.....	57
7.2.2. Coste de reactivos químicos.....	57
7.2.3. Coste del consumo energético.....	58



Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Sa Pobla por simulación mediante el software DESASS



7.2.4. Costes totales de explotación.....	61
7.3. Coste total anual.....	62
7.4. Selección de la alternativa idónea.....	63
<b>8. PROPUESTA IMPLANTACIÓN ALTERNATIVA ÓPTIMA.....</b>	<b>64</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>67</b>





## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Agua y Desarrollo Sostenible

El agua, un bien necesario para la vida en el planeta y cada vez más escaso. A la problemática del cambio climático, con el constante aumento de temperatura y sequías que reducen la disponibilidad de agua, se le suma un consumo excesivo e ineficiente por parte de la actividad humana, haciendo que aunque a priori el agua sea un bien ilimitado, el agua limpia sea un recurso cada vez más escaso al que no todos tienen acceso. Gestos tan sencillos como el lavarse las manos, cuya importancia se ha puesto de manifiesto en la reciente pandemia global causada por el COVID-19, están fuera del alcance de miles de millones de personas en el mundo. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) destaca los siguientes datos preocupantes:

- 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, y 6 de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura.
- La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial y se prevé que este porcentaje aumente.
- Cada día, alrededor de 1.000 niños mueren debido a enfermedades por la falta de higiene.
- 4 billones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como retretes o letrinas.
- Aproximadamente el 70% de todas las aguas extraídas de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para el riego.
- Más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación.

La ONU aprobó en 2015 la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible con el propósito de brindar la oportunidad a la sociedad de mejorar la calidad de vida de las personas y proteger el medio ambiente. De entre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con los que cuenta la Agenda 2030 para transformar el mundo, como educación, defensa del medio ambiente y combatir el cambio climático, entre otros, destaca el ODS 6, de garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Este objetivo pretende alcanzar las siguientes metas de aquí a 2030:

1. Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
2. Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
3. Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
4. Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua.
5. Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, ampliando la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua,



desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.

6. Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

Dentro del marco del cumplimiento del ODS 6, el estado español redactó en octubre de 2018 el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR), aprobándose posteriormente en 2020 la versión consolidada. Dentro de las metas generales del plan destacan los siguientes objetivos:

- Apuesta por las energías renovables y la eficiencia energética.
- Uso racional y solidario de los recursos.
- Lucha contra el cambio climático.
- Reducción de emisiones y descarbonización a largo plazo.
- Apuesta por la transición energética justa que acompañe a los territorios y a los trabajadores afectados, cambiando el modelo centralizado basado en la oferta a otro descentralizado basado en la gestión de la demanda.
- Necesidad de avanzar en el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua (*Directiva 2000/60/CEE*) y demás políticas europeas relacionadas.

De esta manera, el objetivo principal del Plan DSEAR es ordenar, revisar y priorizar las medidas que el estado español debe llevar a cabo en las materias incluidas en el plan para lograr la transición ecológica y atender a la obligación jurídica de cara al ámbito comunitario. Para la consecución de estos objetivos, el plan integra un programa de medidas y actuaciones que incorpora los planes hidrológicos de cuenca y el plan hidrológico nacional.

## 1.2. Tratamiento de las aguas residuales urbanas

Una de las bases del Plan DSEAR es la depuración de las aguas residuales. Y es que antes de poder ser devueltas al medio natural, las aguas residuales urbanas (ARUs) deben ser sometidas a diferentes tratamientos con el fin de evitar o reducir la concentración de los contaminantes presentes en las mismas. Entre los principales contaminantes presentes en las ARUs destacan los sólidos suspendidos, la materia orgánica, nutrientes como el nitrógeno y fósforo en distintas formas, metales pesados, y microorganismos patógenos como bacterias, virus y protozoos (*Salmonella*, *Escherichia Coli*, *Legionella*, etc.). Además, en los últimos años se están encontrando en las aguas residuales los denominados “contaminantes emergentes”. Éstos son contaminantes que, o bien eran desconocidos previamente o que no se les reconocía como tal, y cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí lo es la preocupación por las posibles consecuencias que puedan tener, como fármacos, hormonas y productos de higiene personal, entre otros. Para su eliminación, las ARUs se someten a tratamientos de distinto tipo, los cuales se pueden clasificar en físicos, químicos o biológicos.

Los tratamientos físicos son aquellos que se valen de la aplicación de fuerzas físicas para producir cambios en las características y propiedades del agua. Los tratamientos de este tipo más comunes en las EDAR incluyen: desbaste, mezclado, homogeneización, sedimentación, floculación, flotación, aireación, procesos de membrana, filtración y desinfección por radiación ultravioleta.

Por el contrario, los tratamientos químicos se basan en causar cambios en la calidad del agua por medio de reacciones químicas, provocadas habitualmente mediante la adición de productos

químicos al agua a tratar. Entre los más destacados en el tratamiento de las ARUs destacan la precipitación química, la coagulación y la desinfección.

Respecto a los procesos biológicos, éstos se basan en las reacciones asociadas a los microorganismos presentes en la propia agua residual. Estos microorganismos crecen y se desarrollan utilizando los contaminantes presentes en el agua como fuente de carbono y/o energía (concretamente la materia orgánica y los nutrientes), es decir, como sustrato, para producir nuevos microorganismos, dióxido de carbono y otros compuestos inocuos (Ferrer Polo et al., 2018). La ventaja de este tipo de procesos es que son vistos como “naturales”, puesto que en se basan en intensificar procesos que ocurren en el medio natural, permiten cargas variables y logran altas eficiencias de eliminación. Sin embargo, son susceptibles a la presencia de productos químicos tóxicos para los microorganismos y son considerablemente lentos en comparación con los tratamientos químicos (Cicek et al., 1998). Los procesos biológicos se pueden clasificar en dos tipos:

- Procesos biológicos de cultivo en suspensión: fangos activados, lagunas aireadas, eliminación biológica de nutrientes y tratamiento de fangos para su estabilización.
- Procesos biológicos de soporte sólido: filtros percoladores, contactores biológicos rotativos (RBC), lechos de turba, filtros verdes y procesos anaerobios de biomasa fija.

Los tratamientos biológicos más comunes son los de cultivo en suspensión. En la Tabla 1 se muestra su clasificación.

**Tabla 1.** Clasificación de los procesos biológicos de cultivo en suspensión. (FUENTE: Ferrer Polo et al, 2018)

Tipo de proceso	Aerobio	
	Anóxico	
Tipo de reactor	Anaerobio	
	Flujo continuo	Flujo pistón (RFP) Mezcla completa (RCTA) Flujo disturbado (SBR)
Diagrama de flujo	Flujo discontinuo	
	Con recirculación o sin ella. Procesos especiales: oxidación por contacto, cámaras separadas, etc.)	
Carga másica	Alta carga	
	Convencional	
	Aireación prolongada	

Entre los procesos biológicos de cultivo en suspensión, se podrían distinguir cuatro grandes grupos:

- Fangos activados: procesos aerobios con altos tiempos de retención celular debido a la recirculación de fangos. El aporte de oxígeno se realiza por medios mecánicos (turbinas, difusores, etc.).
- Lagunas aireadas: procesos mayormente aerobios, aunque pueden combinarse con procesos anaerobios. Logran elevados tiempos de retención a costa de considerables volúmenes de reactor. El aporte de oxígeno también se realiza por medios mecánicos.
- Eliminación biológica de nutrientes: procesos derivados de los fangos activados pero de mayor complejidad para lograr la eliminación de nitrógeno y fósforo sin precisar reactivos químicos.

- Tratamientos de fangos: procesos sin recirculación, aerobios o anaerobios, cuyo objetivo es la estabilización de los fangos purgados como exceso en los tratamientos biológicos.

El proceso más comúnmente utilizado en las EDAR son los fangos activados. Tradicionalmente se trataban de procesos aerobios en suspensión, aunque la tendencia actual es incluir dentro de los fangos activados tanto a los procesos de eliminación de materia orgánica como de nutrientes mediante la recirculación de los fangos. En la Figura 1 se muestra el esquema general de este tipo de sistemas.

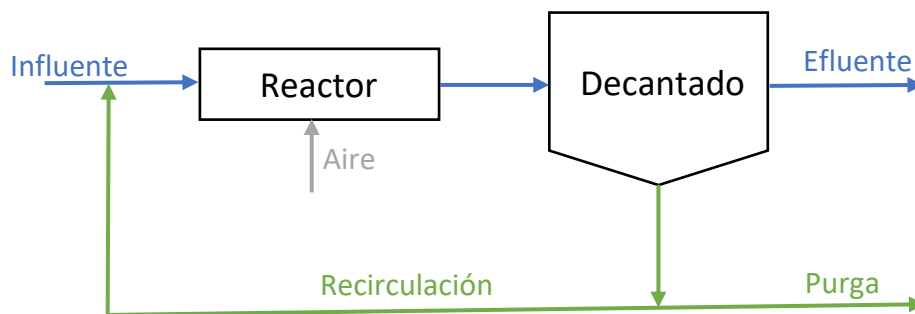


Figura 1. Esquema del proceso de fangos activados.

Los microorganismos que han de separarse del sistema para mantener un proceso estable se denomina fangos en exceso (purga). Estos fangos en exceso y los que se recirculan como se muestra en la Figura 2 se denominan “fangos activados” y contienen los microorganismos que llevan a cabo la depuración biológica del agua residual (Ferrer Polo et al., 2018).

### 1.2.1. Procesos de oxidación total

Los procesos de oxidación total utilizan los mismos esquemas de flujo que los sistemas de fangos activados, pero con tiempos de retención celular considerablemente más elevados (usualmente 20-30 días), por lo que trabaja con cargas másicas bajas. Esto conlleva tiempos de retención hidráulicos elevados, y por tanto, reactores de volúmenes considerables, para mantener concentraciones de SS razonables. Por tanto, se genera una situación altamente competitiva en la que los microorganismos deben competir por el alimento existente, utilizando incluso su propia masa celular. Esto da lugar a un efluente altamente tratado con una baja producción de fangos (Ferrer Polo et al., 2018).

Los sistemas de oxidación total no incluyen decantador primario, siendo usualmente plantas compactas ideales para pequeños municipios. Su principal desventaja es el elevado volumen de reactor requerido, lo que conlleva no sólo una considerable inversión en infraestructura, sino también unos elevados requisitos de aireación y agitación, lo que implica un notable consumo energético. Su principal ventaja reside en la simplificación de la línea de fangos, dado que logra la estabilidad del fango sin precisar de un tratamiento de digestión en la línea de fangos.

### 1.2.2. Eliminación de nutrientes

El nitrógeno y fósforo, nutrientes para los microorganismos, son como contaminantes frecuentes en las aguas residuales urbanas. La mayoría de los tratamientos suelen ser biológicos, aunque en el caso del fósforo no es infrecuente el uso de reactivos químicos (sales de hierro usualmente como cloruro o sulfato) para provocar su precipitación. Se han desarrollado esquemas de proceso orientados a la eliminación simultánea de materia orgánica y nutrientes, existiendo esquemas orientados a la eliminación de un solo nutriente o de los dos simultáneamente. Estos procesos son más complejos que los de eliminación de materia

orgánica, siendo necesaria la combinación de al menos dos etapas: aerobia y anóxica en el caso del nitrógeno, y aerobia y anaerobia en el caso del fósforo. En procesos de eliminación conjunta se requiere de al menos tres etapas: anaerobia, anóxica y aerobia.

Para la eliminación de nitrógeno, el sistema típico utilizado es el Ludzack-Ettinger modificado (Figura 2).

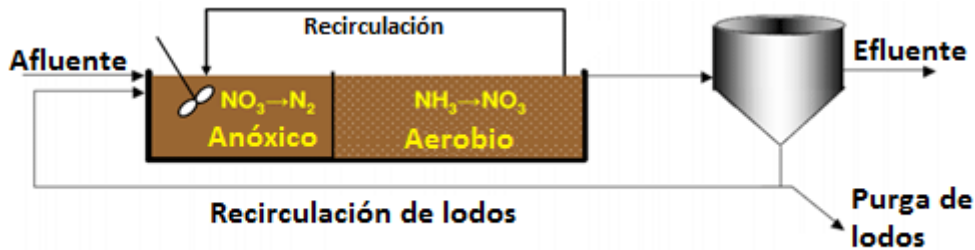


Figura 2. Esquema del proceso Ludzack-Ettinger modificado para la eliminación de nitrógeno.

Este esquema se basa en dos tanques en serie, donde el primero se mantiene en condiciones anóxicas y el segundo en condiciones aerobias. El primer tanque recibe agua del tratamiento primario (si lo hubiera), el fango recirculado desde el decantador secundario y el caudal de la recirculación interna procedente del segundo tanque, en el cual todo el nitrógeno se encuentra en forma de nitratos. Aquí se realiza parte de la degradación de la materia orgánica, utilizando para ello los nitratos como aceptores de electrones, por lo que se reducen a nitrógeno gas. En el segundo tanque se produce de forma simultánea la degradación de la materia orgánica y la oxidación del nitrógeno a nitrato. Desde este tanque se recircula un caudal considerablemente elevado de vuelta al tanque anóxico para la eliminación de los nitratos producidos. La eliminación de nitrógeno conseguida en la totalidad del proceso depende de la magnitud de la recirculación.

En los casos de eliminación conjunta de ambos nutrientes, se busca una eficacia aceptable en la eliminación de ambos controlando posibles problemas de espumas (*bulking*) y minimizando el tamaño de los reactores. El esquema más sencillo es el A<sup>2</sup>/O (Figura 3), compuesto de tres reactores en serie, uno anaerobio, un anóxico y un aerobio, con una recirculación interna del aerobio al anóxico para la producir la desnitrificación de los nitratos producidos en el aerobio.

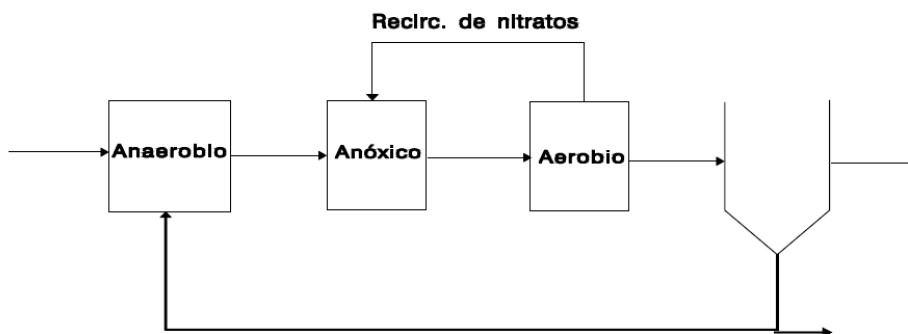


Figura 3. Esquema del proceso A<sup>2</sup>/O para eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo. (FUENTE: Ferrer Polo, 2018)

Para evitar que los polifosfatos almacenados pasen de nuevo al agua y para evitar problemas de sedimentabilidad del fango, es necesario mantener los fangos en condiciones aerobias en el decantador secundario. Esto se logra reduciendo el tiempo de retención en el decantador, por lo que se recomienda la extracción por succión (Ferrer Polo et al., 2018).

### 1.3. Marco Legislativo

#### 1.3.1. Normativa medioambiental europea

La legislación en materia medioambiental ha sido uno de los pilares de la política comunitaria desde la creación de la Comunidad Económica Europea. En esta materia, los instrumentos legislativos a aplicar son las Directivas, las cuales marcan unos objetivos obligatorios pero otorgando a los Estados Miembros libertad en la elección de metodología a aplicar para lograr los mismos. De las que afectan al tratamiento de aguas destacan la Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, y la Directiva 2000/60/CEE, denominada Directiva Marco del Agua, que establece un marco comunitario común de actuación en política de aguas.

▪ *Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.*

El objetivo de esta Directiva es proteger al medio ambiente de los efectos negativos que puedan causar al mismo los vertidos de aguas residuales. De acuerdo con el artículo 3, las aglomeraciones urbanas deben disponer de un sistema de colectores que permita la recogida de las aguas residuales urbanas producidas en las mismas, las cuales, según el artículo 4, deben someterse a un tratamiento previo a su vertido a las masas de agua continentales o marinas.

A su vez, el artículo 5 especifica la necesidad de un tratamiento más riguroso para los vertidos realizados en “zonas sensibles”. Estas “zonas sensibles” se consideran como tal por ser eutróficas o por estar en riesgo de serlo de no tomar las medidas de protección necesarias. Del mismo modo, en el artículo 6 se permite un tratamiento menos riguroso en aquellas zonas denominadas “menos sensibles”, las cuales se pueden considerar como tal cuando el vertido de aguas residuales no provoque efectos negativos sobre el medio ambiente debido a la morfología, hidrología o condiciones hidráulicas específicas existentes en dicha zona. La Directiva marca los criterios para determinar tanto las zonas sensibles como las menos sensibles en el Anexo II.

Los requisitos específicos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales sujetos a los artículos 4 y 5 vienen recogidos en el Anexo I. Estos requisitos se detallan en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (FUENTE: Cuadro 1 Directiva 91/271/CEE).

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción <sup>1</sup>
DBO <sub>5</sub> (a 20°C sin nitrificación) <sup>2</sup>	25 mg O <sub>2</sub> /l	70-90 40 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4
DQO	125 mg O <sub>2</sub> /l	75
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l <sup>3</sup>	90
	35 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (> 10.000 h-e) 60 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (2000-10.000 h-e)	90 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (> 10.000 h-e) 70 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (2000-10.000 h-e)

<sup>1</sup>Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada; <sup>2</sup>Sustituible por carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO) o relación entre DBO<sub>5</sub> y parámetro sustitutivo; <sup>3</sup>Este requisito es optativo.



## Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Sa Pobra por simulación mediante el software DESASS



Para aquellas zonas declaradas como sensibles conforme al artículo 5 y que requieren de un tratamiento más riguroso, se deben cumplir los requisitos de la Tabla 3, que hacen referencia a la reducción de la concentración de nutrientes en el vertido, concretamente nitrógeno y fósforo, especificados como nitrógeno y fósforo totales.

**Tabla 3.** Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización (FUENTE: Cuadro 2 Directiva 91/271/CEE).

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción <sup>1</sup>
Fósforo total	2 mg P/l (10.000-100.000 h-e) 1 mg P/l (más de 100.000 h-e)	80
Nitrógeno total <sup>2</sup>	15 mg N/l 10 mg N/l	70-80

<sup>1</sup> Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada; <sup>2</sup> Nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico + NH<sub>4</sub>), nitrógeno en forma de nitrato y nitrito

▪ *Directiva 2000/60/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 23 de octubre, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.*

El objetivo de la Directiva Marco del Agua es establecer un marco comunitario común para la protección tanto de las aguas superficiales continentales como las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que:

- Tenga por objeto una mayor protección y mejora del medio acuático mediante, entre otras formas, el uso de medidas específicas de interrupción, supresión gradual y/o reducción progresiva de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias prioritarias.
- Prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos.
- Promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles.
- Garantice la reducción progresiva de la contaminación del agua subterránea y evite nuevas contaminaciones.
- Contribuya a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

A su vez, debe contribuir de esta forma a:

- Garantizar el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado, tal como requiere un uso del agua sostenible, equilibrado y equitativo.
- Reducir de forma significativa la contaminación de las aguas subterráneas.
- Proteger las aguas territoriales y marinas.
- Lograr los objetivos de los acuerdos internacionales pertinentes.

Además de establecer unos objetivos medioambientales homogéneos entre los Estados Miembros, el reto principal de esta Directiva es tomar medidas para proteger las aguas tanto en términos cuantitativos como cualitativos y garantizar así su sostenibilidad futura. Entre los aspectos más relevantes de la DMA en relación con la planificación hidrológica destaca la participación pública, las demarcaciones hidrográficas, estudios generales de las demarcaciones, zonas protegidas, programa de medidas y recuperación de costes.

A continuación se mencionan otras directivas europeas relacionadas con las aguas residuales:



- *Directiva 2001/42/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 27 de junio, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente (Evaluación Ambiental Estratégica).*
- *Directiva 2004/35/CEE, sobre la responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños ambientales.*
- *Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).*
- *Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 16 de abril, por la que se modifica la Directiva 2011/92/UE, relativa a la evaluación de repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.*

### 1.3.2 Normativa ambiental estatal

En lo que respecta a la legislación española que afectan a las aguas residuales, destacan las siguientes normas:

- *Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales.*

La importancia de esta norma reside en que contiene la trasposición de la *Directiva 91/271/CEE*, con el objetivo de proteger la calidad de las aguas tanto continentales como marítimas de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales urbanas.

- *Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.*

Este Real Decreto desarrolla el *Real Decreto-ley 11/1995*, complementando las normas sobre recogida, depuración y vertido de las aguas residuales urbanas, así como la aplicación de distintos tratamientos previos a su vertido, considerando si se va a producir en zona sensible o menos sensible. A su vez, establece los valores límite de vertido, trasponiendo los de la *Directiva 91/271/CEE*.

A continuación se mencionan otras normas estatales relacionadas con las aguas residuales:

- *Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.*
- *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.*
- *Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 20/1985, de 2 de agosto, de Aguas.*
- *Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.*
- *Real Decreto Ley 4/2007, de 13 de abril, por el que se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobada por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.*
- *Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.*
- *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*



### 1.3.3 Normativa ambiental autonómica

En este apartado se destaca la normativa ambiental más relevante en relación con la depuración de las aguas residuales de la Comunidad Autónoma de las Islas Baleares, dado que el municipio de Sa Pobra se ubica en la isla de Mallorca. La norma más destacable es la siguiente:

- *Decreto 49/2003, de 9 de mayo, por el que se declaran las zonas sensibles de las Islas Baleares.*

El objeto de este decreto es la declaración de las zonas sensibles, normales y menos sensibles de las Islas Baleares, de acuerdo con las condiciones establecidas en el *RD 509/1996*, y establece los límites de vertido para cada tipo de zona. En la Tabla 4 se detallan los límites de vertido según lo establecido en el artículo 4.

**Tabla 4.** Requisitos para los vertidos procedentes de aguas residuales urbanas en zonas sensibles eutróficas (FUENTE: Artículo 4 Decreto 49/2003).

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción <sup>1</sup>
DBO <sub>5</sub>	25 mg O <sub>2</sub> /l	70-90
DQO	125 mg O <sub>2</sub> /l	75
SS	35 mg/l	–
P	2 mg/l (10.000-100.000 h-e) 1 mg/l (>100.000 h-e)	80
N	15 mg/l (10.000-100.000 h-e) 10 mg/l (>100.000 h-e)	70-80

De entre los listados de zonas sensibles, destaca en la lista de zonas sensibles por eutrofización en la isla de Mallorca s'Albufera, un área de humedales cerca del municipio de Sa Pobra.

A continuación se mencionan otras normas autonómicas relacionadas con las aguas residuales:

- *Decreto 132/1995, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento para el desarrollo de la Ley 9/1991, de 27 de noviembre, reguladora del canon de saneamiento de aguas.*
- *Decreto 58/2005, de 27 de mayo, por el que se regula el otorgamiento de concesiones de aguas subterráneas para usos agrarios.*



## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster consiste en estudiar diferentes alternativas de diseño para la ampliación y mejora de la estación depuradora de aguas residuales Sa Pobra, de acuerdo con los objetivos del Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (DSEAR) mediante el uso del software DESASS.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el estado actual de la EDAR Sa Pobra.
- Caracterizar el influente a la planta.
- Planteamiento de diferentes alternativas
- Simulación de las alternativas mediante el software DESASS.
- Establecer las condiciones óptimas de trabajo en las alternativas propuestas.
- Valorar la viabilidad económica de cada alternativa.
- Comparar y escoger la alternativa idónea.

### 3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EDAR SA POBLA

El sistema de tratamiento y saneamiento de Sa Pobra está gestionado por la Agencia Balear del Agua y de la Calidad Ambiental, conforme al convenio de colaboración formalizado el 5 de febrero de 1990. El sistema, diseñado para tratar un caudal diario de 12.000 h.eq., está compuesto por una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR), un emisario que restituye el agua tratada y una red de saneamiento constituida por una estación de bombeo desde la cercana villa de Crestatx (perteneciente al mismo municipio) así como por el entramado de colectores y conducciones que transportan el agua residual desde de la red municipal hasta la EDAR.

La mayor parte del sistema general de saneamiento tiene una antigüedad de más de 20 años, y aunque con el tiempo se han realizado una serie de mejoras en la red de colectores y en la EDAR, es preciso realizar una remodelación completa de esta última para adaptarla tanto al incremento del caudal de entrada como a los requisitos de vertido marcados por la legislación actual.

#### 3.1. Ubicación de la EDAR Sa Pobra

La EDAR Sa Pobra se encuentra en el área septentrional de la isla de Mallorca, a poco más de un kilómetro al noreste del municipio de Sa Pobra, un municipio agrícola de más de 13000 habitantes, al cual da servicio.



Figura 4. Localización de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: Google Maps).



Figura 5. Vista actual de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: Diario de Mallorca).

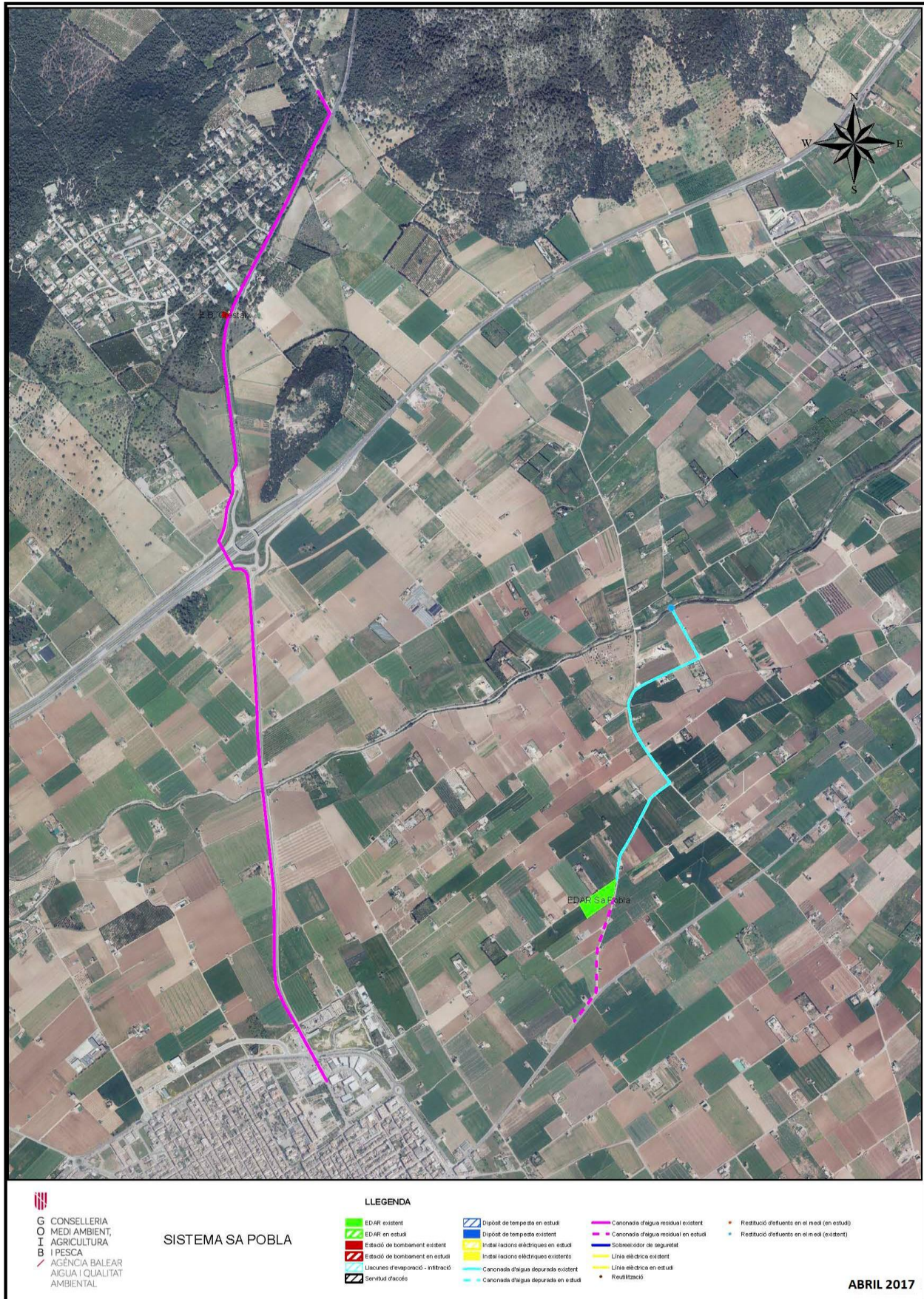


Figura 6. Localización del sistema de saneamiento de Sa Pobra (FUENTE: Documentación adicional licitación de la redacción del proyecto de ampliación, ABAQUA).

En la Figura 6 se muestra la ubicación del sistema de saneamiento de Sa Pobra, incluyendo la EDAR, los colectores y la estación de bombeo desde la villa de Crestatx, así como el punto de vertido, en el Canal de Siurana. Este canal desemboca en s'Albufera de Mallorca.

Ubicada a unos 3 km al este de la estación depuradora, s'Albufera de Mallorca es considerada como la zona húmeda más extensa de las Islas Baleares. Con una superficie de unas 1.700 ha, fue declarada Parque Natural en enero de 1988 (Decret 4/1988). Además, está incluida en el convenio de Ramsar y en la Red Natura 2000 como Zona Especial de Protección para las Aves (ZEPA) y Lugar de Interés Comunitario (LIC).

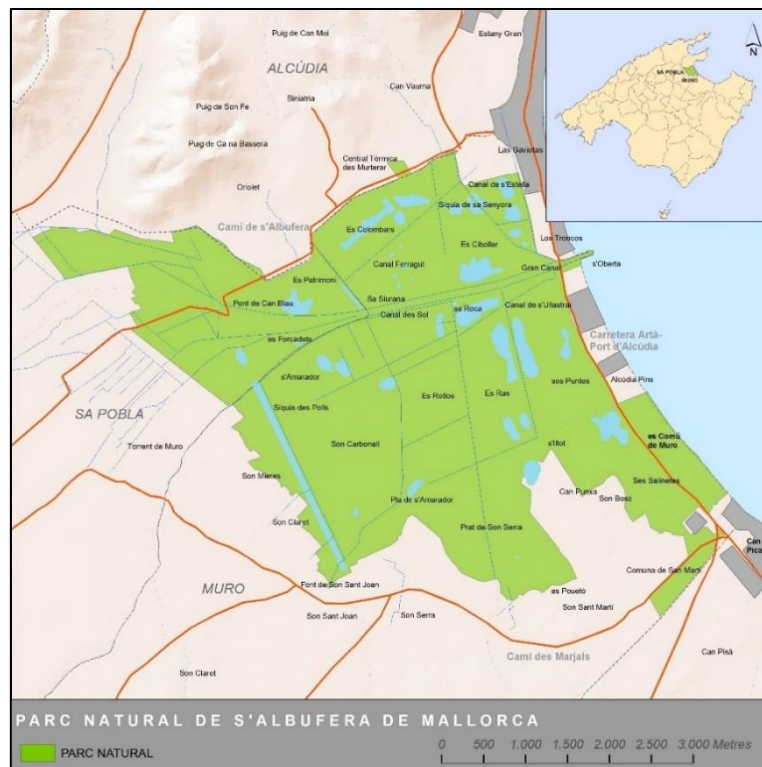


Figura 7. Mapa del Parque natural de s'Albufera de Mallorca (Fuente: GOIB).

La zona que rodea al Parque natural se dedica en gran medida a la actividad agrícola intensiva, lo que provoca unas concentraciones muy elevadas de nitratos, que desde hace décadas llegan a los acuíferos de la zona y, por ende, al Parque Natural. Esta problemática, reconocida desde hace 30 años por la Unión Europea (Directiva 91/676/CEE), provocó la declaración de la subcuenca de Sa Pobra como la primera zona vulnerable en las Islas Baleares en el año 2000, en el Plan Hidrológico de las Islas baleares (RD 378/2001). Posteriormente, se declaró zona sensible por eutrofización de acuerdo con el Decreto 49/2003, del 9 de mayo, por el que se declaran las zonas sensibles en las islas Baleares.

La problemática de los nitratos llegó a afectar no sólo al Parque Natural, sino también al suministro de agua potable del municipio durante años, haciendo su consumo no recomendable hasta el año 2007, cuando se puso en funcionamiento una instalación de osmosis inversa para la producción de agua potable (Ballester, 2007).



### 3.2. Evolución histórica de la EDAR Sa Pobra

La EDAR como tal se proyectó en el 1990, cuando se realizó una reforma sobre unos tanques Imhoff existentes. Para su dimensionamiento, se tomaron los siguientes datos:

- Caudal diario: 2.000 m<sup>3</sup>/d
- Caudal medio: 83,33 m<sup>3</sup>/h
- Caudal punta: 166 m<sup>3</sup>/h
- DBO<sub>5</sub>: 262,50 mg/l
- SS: 450 mg/l

Respecto a los parámetros de salida, se optó por los siguientes:

- DBO<sub>5</sub>: 20 mg/l
- SS: 20 mg/l

Se optó por un sistema de fangos activos en aireación prolongada en módulo compacto compuesto por dos recintos biológicos, un decantador rectangular y una cámara de cloración.

El pretratamiento constaba de un canal de desbaste de con una reja de gruesos manual y una de finos automática seguido de un desarenador. El módulo biológico estaba conformado por dos compartimentos de 750 m<sup>3</sup> con una turbina para la aireación de cada uno. Adyacentes a los mismos, se adosó un recinto rectangular con un puente alternativo móvil, el cual haría las funciones de decantación secundaria. La línea de fangos la conformaban un pequeño espesador y la deshidratación por filtros banda. Para la desinfección, se optó por la dosificación de hipoclorito.

Posteriormente, en el año 1996, se realizó una remodelación de la EDAR que contemplaba los siguientes parámetros de influente para su diseño:

- Caudal diario: 2.000 m<sup>3</sup>/d
- Caudal medio: 83,33 m<sup>3</sup>/h
- Caudal punta: 200,00 m<sup>3</sup>/h
- DBO<sub>5</sub>: 450 mg/l
- SS: 350 mg/l
- NTK: 50 mg/l
- Temperatura mínima: 17°C
- Temperatura máxima: 22°C

Respecto a los parámetros de salida, se optó por los siguientes:

- DBO<sub>5</sub>: 25 mg/l
- SS: 35 mg/l
- NTK: 15 mg/l

Se sustituyó todo el pretratamiento, instalando unas nuevas rejillas gruesas manuales, cambiando las rejillas finas por un tamiz y un nuevo desarenador. Se aumentó la altura útil del módulo biológico, elevando el volumen de cada compartimento a 976 m<sup>3</sup> y se pasó a utilizar uno de ellos como digestor de fangos. Respecto a la aireación, se sustituyeron las turbinas por tres grupos motosoplantes, alimentando uno a cada compartimento y el tercero de reserva y la difusión de aire pasó a realizarse mediante difusores. El antiguo recinto de decantación secundaria se habilitó como zona anóxica del reactor biológico para la eliminación de nitrógeno, incrementando también su calado hasta alcanzar un volumen de 464 m<sup>3</sup> e instalando un agitador



## Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Sa Pobra por simulación mediante el software DESASS



sumergible. A su vez, se instaló una bomba sumergible en el reactor aerobio para la recirculación interna hacia el anóxico. Para la decantación secundaria se construyó un nuevo decantador circular de 16 m de diámetro.

Respecto a la línea de fangos, como se ha comentado, se estableció uno de los compartimentos del módulo biológico como digestor, se mantuvo el espesador y se sustituyó el filtro banda por una centrífuga.

Finalmente, en 2011 se realizó una última actuación en la EDAR, en la que se sustituyó un tramo del colector de llegada, se instaló una nueva reja automática de gruesos y un nuevo equipo de bombeo de agua bruta. A su vez, se instaló un tanque de laminación de caudales de 55m<sup>3</sup> y se modificaron los equipos eléctricos, cambiando el cuadro eléctrico existente e incorporando los nuevos equipos mecánicos instalados. En la Figura 8 se muestra el plano actual de la EDAR Sa Pobra.

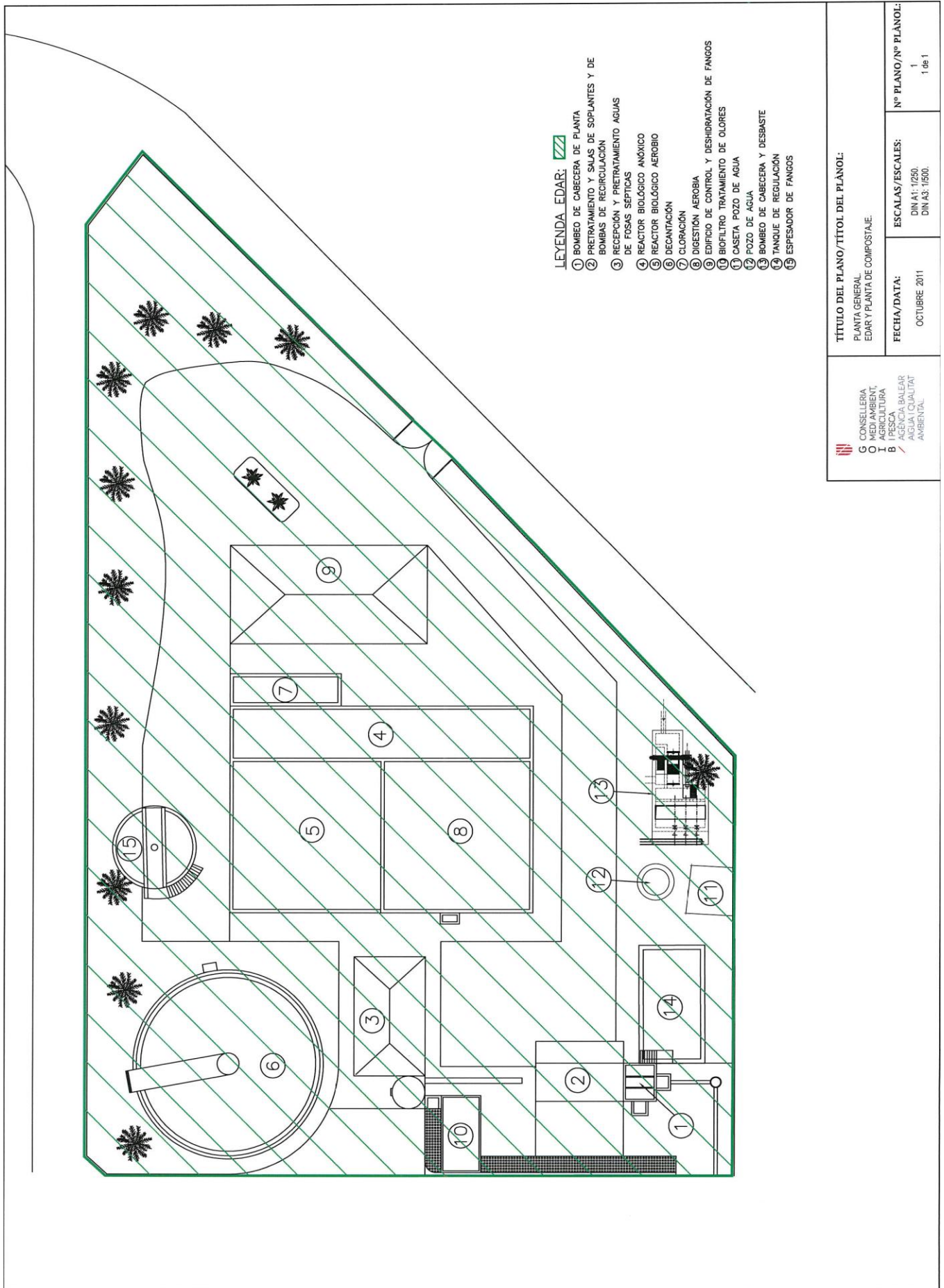


Figura 8. Plano actual de la planta general de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: Documentación técnica adicional, Govern de les Illes Balears - GOIB).



### 3.3. Problemática actual

La última ampliación de la EDAR Sa Pobla se realizó en 1996, pasando a estar diseñada para tratar una población de 12000 h.e. Desde entonces, el municipio ha experimentado un crecimiento demográfico significativo (Tabla 5), lo cual ha causado un aumento notable del caudal de influente a la planta.

**Tabla 5.** Población censada en el municipio de Sa Pobla (FUENTE: Institut d'Estadística de les Illes Balears - IBESTAT)

Año	Población
1998	10.064
2001	10.736
2004	11.442
2007	12.141
2010	12.831
2013	12.901
2016	12.714
2019	13.475

A su vez, en 2007 se puso en funcionamiento una instalación de osmosis inversa para la producción de agua potable para consumo humano, la cual genera un importante volumen de aguas de rechazo. Además, el mismo año, se instaló en el municipio una lavandería industrial.

Todos estos hechos han provocado un aumento no sólo del caudal de agua residual que llega a la EDAR, sino también de las cargas contaminantes de las mismas, provocando que la depuradora funcione por encima de su capacidad de diseño. Esto provoca una mala calidad de las aguas que llegan al Parque Natural de s'Albufera, contaminando el mismo con aguas fecales y agravando el problema de eutrofización en el mismo (Jiménez, 2019).

Por otro lado, no existe separación entre la red de pluviales y la de saneamiento del municipio, lo que provoca la llegada a la EDAR de un caudal muy superior al de diseño durante los días de lluvia, agravando aún más el problema anterior (Frau, 2022).

Finalmente, gran parte de los elementos que conforman la planta han llegado al final de su vida, por lo que es necesaria su renovación.

Por todo ello, en 2017 la Agencia Balear del Agua y Calidad Ambiental (ABAQUA) aprobó la redacción del proyecto de ampliación y mejora de la EDAR, llegando a ser una de las actuaciones necesarias reflejadas en el Plan DSEAR.

Para tener espacio suficiente para la nueva construcción, se expropió una parcela colindante con una superficie de unos 8.800 m<sup>3</sup>, por lo que la superficie total disponible para la nueva EDAR ascendió a unos 12.200 m<sup>3</sup>.

#### 4. CARACTERIZACIÓN DEL INFLUENTE

El primer paso para poder realizar las diferentes simulaciones consiste en caracterizar el agua que llega a la planta, determinando parámetros como la temperatura, el caudal, la concentración de sólidos y su volatilidad, la concentración de materia orgánica, su biodegradabilidad y la presencia de nutrientes.

Para ello, se han utilizado tanto los valores estimados en el pliego de condiciones técnicas para la redacción del proyecto como el promedio obtenido de las analíticas realizadas por ABAQUA entre enero de 2017 y septiembre de 2019 (Tabla 6), adjuntadas a la oferta de licitación. Para el resto de parámetros se han supuesto valores típicos para un agua residual urbana.

**Tabla 6.** Resultados promedio mensuales de las analíticas del influente de la EDAR Sa Pobra (Fuente: ABAQUA)

Mes	Q	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	N <sub>T</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P <sub>T</sub>	PO <sub>4</sub>	pH
	m <sup>3</sup> /d	mg/l	mg/l	mg/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg P/l	mg P/l	
ene-17	1.929,00	240,00	901,00	420,00	86,70	59,60	0,80	11,40	10,10	7,12
feb-17	1.849,00	360,00	951,00	400,00	77,00	73,40	0,74	11,10	9,76	7,22
mar-17	1.800,00	629,00	953,00	420,00	84,40	68,40	0,73	14,10	12,70	6,81
abr-17	1.974,00	540,00	960,00	630,00	77,40	59,00	0,66	10,60	10,20	7,37
may-17	2.075,00	480,00	938,00	470,00	85,30	57,60	0,71	13,50	12,60	7,02
jun-17	2.170,00	480,00	696,00	380,00	51,60	25,10	0,85	12,60	11,92	7,01
jul-17	2.016,00	594,00	838,00	300,00	66,00	51,00	0,71	11,98	8,70	7,98
ago-17	2.053,00	440,00	1.018,00	470,00	65,80	53,60	0,83	13,30	12,90	6,72
sep-17	2.077,00	420,00	883,00	433,00	64,80	52,20	0,79	14,80	14,30	6,98
oct-17	2.037,00	350,00	830,00	390,00	62,90	56,00	0,82	16,60	15,70	7,08
nov-17	1.847,00	500,00	1.822,00	275,00	62,70	45,00	0,98	12,20	10,40	7,34
ene-18	1.755,00	500,00	797,00	390,00	110,00	91,40	0,80	13,60	12,40	7,12
feb-18	1.685,00	530,00	1.001,00	460,00	83,50	69,40	0,93	9,77	8,37	8,14
mar-18	1.843,00	300,00	1.040,00	364,00	89,30	67,60	0,91	13,60	9,28	7,81
abr-18	1.878,00	280,00	811,00	450,00	64,70	44,20	0,85	11,60	9,00	7,69
may-18	1.929,00	420,00	955,00	273,00	74,70	51,80	0,96	14,40	12,66	7,82
jun-18	2.099,00	340,00	642,00	354,00	54,20	40,20	0,60	13,90	13,20	7,73
jul-18	2.233,00	880,00	997,00	482,00	76,70	64,20	0,74	14,10	12,80	7,31
ago-18	2.247,00	666,00	1.267,00	500,00	80,10	61,30	0,72	15,70	14,70	8,00
sep-18	2.226,00	440,00	781,00	360,00	69,00	54,80	0,52	8,96	7,30	7,02
oct-18	2.112,00	520,00	1.025,00	500,00	50,00	41,20	0,76	15,00	14,10	7,24
nov-18	2.338,00	520,00	1.148,00	480,00	67,20	52,10	0,69	10,90	9,10	7,25
dic-18	1.990,00	360,00	916,00	384,00	80,70	55,90	0,75	11,40	10,60	7,08
ene-19	1.789,00	442,00	1.059,00	490,00	93,50	63,40	0,77	15,30	13,20	7,11
feb-19	1.937,00	584,00	1.131,00	660,00	120,00	87,30	0,82	12,93	9,40	7,73
mar-19	1.853,00	1.100,00	2.058,00	1.285,00	94,40	65,60	0,61	14,30	13,50	7,84
abr-19	1.822,00	670,00	1.331,00	692,00	88,40	75,80	0,81	15,40	13,20	7,02
may-19	2.244,00	480,00	700,00	320,00	84,60	50,60	0,69	14,40	12,80	7,35
jun-19	2.368,00	568,00	980,00	370,00	75,10	71,80	0,73	15,50	12,60	6,75
jul-19	2.333,00	496,00	840,00	360,00	56,00	39,30	0,67	16,50	13,70	7,30
ago-19	1.929,00	580,00	1.128,00	420,00	58,80	48,90	0,78	15,40	12,10	7,12
sep-19	1.849,00	413,00	878,00	413,00	86,30	56,40	0,61	15,90	13,76	7,22

#### 4.1. Caudal

Respecto al caudal del influente, de acuerdo con los datos de las series históricas (Tabla X), la planta recibió entre aproximadamente 1680 y 2370 m<sup>3</sup>/d, existiendo variación estacional entre los meses más fríos (de noviembre a marzo), en los que el influente es menor a 2000 m<sup>3</sup>/d, y los más cálidos (de abril a octubre), en los que se supera esta cifra. El caudal promedio del influente entre 2017 y 2019 fue de 2017 m<sup>3</sup>/d. Sin embargo, en previsión del crecimiento poblacional, en el pliego de prescripciones técnicas para la redacción del proyecto se propone un caudal de diseño de **3850 m<sup>3</sup>/d**, sin previsiones de variación estacional. Por tanto, se ha decidido asumir ese valor para el caudal medio (Q<sub>med</sub>) diario que llegará a la planta depuradora.

En lo que respecta al factor punta, éste se ha aproximado a partir del caudal máximo y el caudal medio recibidos entre los años 2017 y 2019, ambos obtenidos con los datos de la Tabla 6:

$$F_{punta} = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{Q_{promedio}} = \frac{2368 \text{ m}^3/\text{d}}{2017 \text{ m}^3/\text{d}} = 1,174 \approx 1,2 \quad \text{Ec.1}$$

Por tanto, suponiendo ese factor punta de 1,2 el caudal punta del influente será de **4620 m<sup>3</sup>/d**. Para el factor de contaminación punta y para el de pluviales se han tomado valores típicos, siendo éstos de 1,5 para el de contaminación punta y de 1,0 para el de pluviales (por lo que el caudal de pluviales se estima igual al caudal punta).

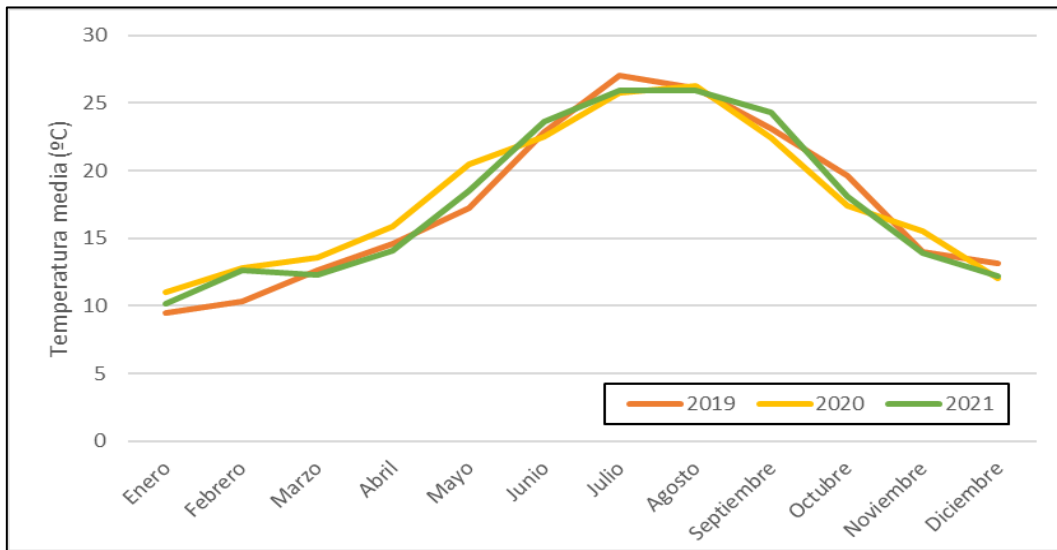
#### 4.2. Temperatura

Respecto a la temperatura del influente, no se disponen de datos de ésta ni en las series históricas ni en el pliego de prescripciones técnicas para la redacción del proyecto. Por tanto, se ha decidido tomar una aproximación de acuerdo con datos estadísticos de la estación meteorológica más cercana. La estación perteneciente a AEMET más cercana se encuentra en el Aeropuerto de Palma de Mallorca, a más de 35 km de la EDAR. Sin embargo, existe una estación meteorológica mucho más cercana, perteneciente a la red de Balears Meteo, que se encuentra a la entrada del propio municipio de Sa Pobra, a tan sólo un par de Km de la EDAR. En la Tabla 7 se muestran los datos de temperatura de los últimos tres años en dicha estación meteorológica:

**Tabla 7.** Temperaturas promedio mensuales en la estación meteorológica de Sa Pobra (Fuente: Balears Meteo)

Mes	Temperatura media (°C)			Temperatura máxima (°C)			Temperatura mínima (°C)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Enero	9,5	11,0	10,2	14,9	16,2	14,8	4,5	6,5	6,0
Febrero	10,3	12,8	12,6	16,8	18,9	17,7	4,4	7,6	7,6
Marzo	12,6	13,6	12,3	18,2	17,8	16,9	7,0	9,0	7,3
Abril	14,6	15,9	14,1	19,2	20,5	18,9	9,9	11,2	9,5
Mayo	17,2	20,5	18,5	22,5	25,8	23,5	11,8	14,8	13,6
Junio	22,9	22,5	23,6	28,7	27,4	28,5	16,8	17,2	18,5
Julio	27,0	25,8	25,9	32,7	30,9	31,3	20,9	19,8	20,2
Agosto	26,1	26,3	25,9	31,0	31,7	30,6	20,9	20,7	21,2
Septiembre	23,1	22,4	24,3	28,0	27,8	29,1	18,8	17,4	20,2
Octubre	19,6	17,4	18,1	24,9	22,8	23,1	14,5	12,2	13,4
Noviembre	14,0	15,5	13,9	18,2	20,4	16,6	9,6	11,1	11,2
Diciembre	13,1	12,0	12,2	18,1	16,3	17,0	8,8	7,5	8,0
Media anual	17,5	18,0	17,6	22,8	23,0	22,3	12,3	12,9	13,1
<b>Media 3 años</b>	17,7			22,7			12,8		

En la Figura 9 se muestra la evolución temporal de la temperatura media mensual. En ella se puede apreciar que la temperatura sigue una tendencia muy similar durante los tres años, lo cual es esperable dado que la diferencia entre las temperaturas medias anuales es inferior a 1°C.



**Figura 9.** Evolución temporal de la temperatura media mensual de los años 2019, 2020 y 2021 en la estación meteorológica de Sa Pobra (FUENTE:Balears Meteo).

Para el cálculo de la temperatura del agua residual que llega a la EDAR, se va a tomar como referencia el valor promedio de las temperaturas medias de los meses más fríos (diciembre, enero, febrero y marzo) para las condiciones de invierno y la de los meses más cálidos (junio, julio, agosto y septiembre) para las condiciones de verano.

Sin embargo, la temperatura del agua no suele ser la misma que la del ambiente, sino que suele ser un poco más alta en invierno que la ambiental (aproximadamente 3-4 °C) y algo más baja en verano (unos 2-3 °C). En la Tabla 8 se muestran los datos resultados de la temperatura del agua residual estimadas:

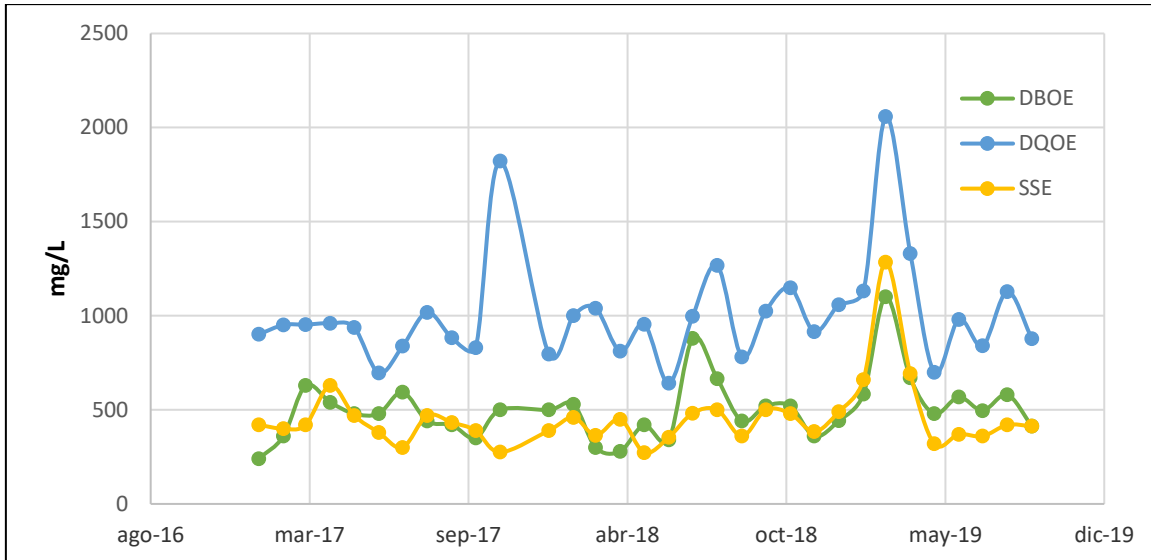
**Tabla 8.** Cálculo de la temperatura estimada del agua residual en condiciones de invierno y verano.

AÑO	Temperatura invierno (°C)	Temperatura verano (°C)
2019	11,4	24,8
2020	12,3	24,2
2021	11,8	24,6
Media 3 años	11,8	24,5
<b>Temperatura estimada</b>	<b>15</b>	<b>23</b>

Por tanto, se estima que la temperatura del agua residual que llega a la EDAR Sa Pobra oscila aproximadamente sobre los **15 °C** en la temporada de invierno y los **23 °C** en la temporada de verano.

### 4.3. Demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno y sólidos suspendidos

El siguiente paso para caracterizar el agua residual que llega a la EDAR es determinar parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la concentración de sólidos suspendidos (SST). Afortunadamente, de estos parámetros sí que se tienen datos desde el año 2017 al 2019 (Tabla X). La evolución de estos parámetros se puede observar en la Figura X.



**Figura 10.** Evolución histórica de la concentración de DQO, DBO<sub>5</sub> y SST del influente de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: ABAQUA).

En lo que respecta a la DQO del influente, ésta se encuentra entre los 1500 mg/l y los 640 mg/l, a excepción de 2 picos de concentración, tal como se puede apreciar en la Figura 10. Debido a la considerable diferencia respecto al resto de datos, se sospecha que puede tratarse de datos anómalos. A su vez, existen fluctuaciones considerables entre el valor de un mes y el siguiente, por lo que no parece seguir una tendencia estacional.

Respecto a la DBO<sub>5</sub>, ésta parece oscilar entre los 670 mg/l y 240 mg/l, a excepción de 2 picos de concentración, uno de ellos coincidente con un pico de concentración de DQO, como se puede apreciar en la Figura 10. Debido a la disparidad respecto al resto de valores, se sospecha que se trata de *outliers*, por lo que se pasará esta serie por un tratamiento. A su vez, tampoco parece seguir una tendencia estacional dada la fluctuación en su concentración de un mes a otro.

En el caso de la concentración de sólidos suspendidos del influente, ésta se encuentra en el rango de 270-700 mg/l, a excepción de un considerable pico de concentración, tal como se puede apreciar en la Figura 10. Dada la notable diferencia respecto al resto de datos, se sospecha que pueda tratarse de un valor anómalo. En este caso tampoco parece existir una tendencia estacional.

Para determinar si realmente existen *outliers* o no, se va a realizar el test de Tukey. Este test toma como referencia el rango intercuartílico (IQR), es decir, la diferencia entre el primer cuartil (Q<sub>1</sub>) y el tercer cuartil (Q<sub>3</sub>). Según la distancia a uno de esos cuartiles, el test diferencia entre atípicos leves y atípicos extremos (Tukey, 1977). Se considera valor atípico leve aquel valor (q) que cumpla una de estas condiciones:

$$q < Q_1 - 1,5 \cdot IQR$$

$$q > Q_3 + 1,5 \cdot IQR$$

Por el contrario, los valores atípicos extremos son aquellos que cumplen estas condiciones:

$$q < Q_1 - 3 \cdot IQR$$

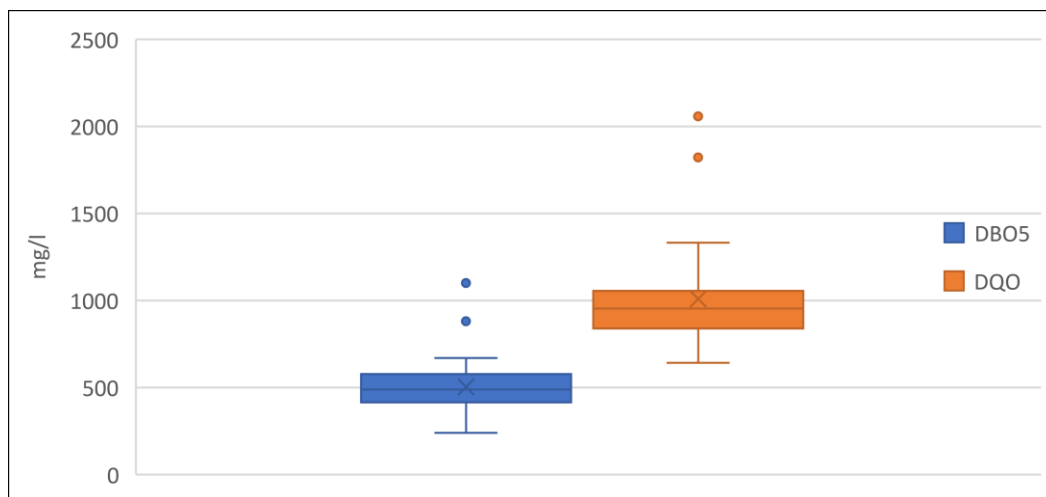
$$q > Q_3 + 3 \cdot IQR$$

Se procede a calcular los cuartiles y los límites a partir de los cuales un valor se considera anómalo leve o extremo a partir de las series históricas de la DQO de la Tabla 6. Estos cálculos se muestran en la Tabla 9:

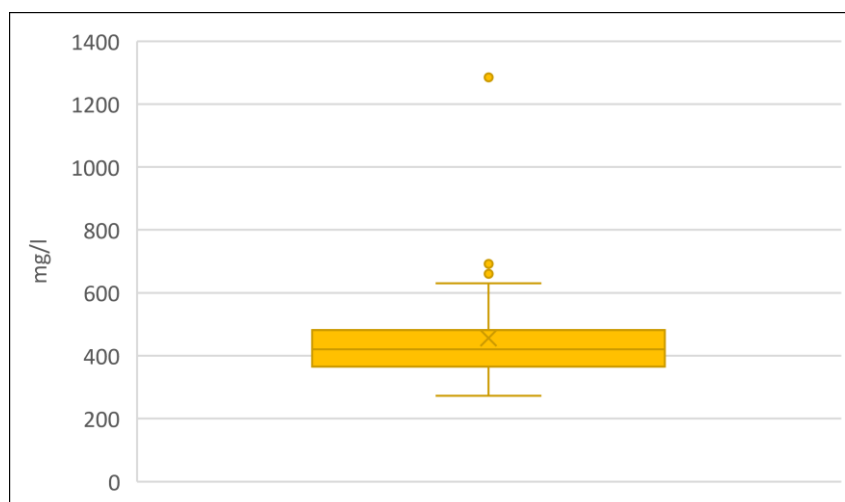
**Tabla 9.** Cuartiles, rango intercuartílico y límites a partir de los que los valores se consideran anómalos en las series históricas de la DQO, la DBO<sub>5</sub> y los SST.

	DQO (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	SST (mg/l)
Q <sub>1</sub>	838,50	414,75	365,50
Q <sub>3</sub>	1.054,25	577,00	481,50
IRQ (Q <sub>3</sub> - Q <sub>1</sub> )	215,75	162,25	116,00
Límite superior leve	1.377,875	820,375	655,50
Límite superior extremo	1.701,50	1.063,75	829,50
Límite inferior leve	514,875	171,375	191,50
Límite inferior extremo	191,25	-72,00	17,50

Una vez calculados los límites a partir de los cuales un valor se puede considerar anómalo leve o extremo, se comprueban las series históricas. En el caso de la DQO se han encontrado dos valores anómalos extremos, al igual que en el caso de la DBO<sub>5</sub>, mientras que en el caso de los SS se han encontrado un dato anómalo extremo y dos leves. En las Figuras 11 y 12 se muestran los diagramas de cajas y bigotes para cada una de las series de parámetros:



**Figura 11.** Diagrama de cajas y bigotes correspondientes a la DBO<sub>5</sub> y a la DQO.



**Figura 12.** Diagrama de cajas y bigotes correspondiente a los sólidos suspendidos del influente.

Como se puede apreciar, en los diagramas de cajas y bigotes también aparecen los valores anómalos, y la distancia de los atípicos extremos con el resto de los valores es considerable.

Para el cálculo de los valores promedio para caracterizar el influente de cara a realizar las simulaciones, se ha decidido excluir sólo aquellos valores que se consideren extremos. En la Tabla 10 se muestran los valores promedio excluyendo dichos valores:

Tabla 10. DQO, DBO<sub>5</sub> y SST del influente de entrada a la EDAR.

DQO (mg/l)	946,50
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	484,60
SST (mg/l)	429,35

Estos valores serán considerados tanto para condiciones de invierno como de verano, puesto que dada la fluctuación de los valores de un mes al siguiente no se ha podido determinar una tendencia estacional.

#### 4.4. Nitrógeno total, amonio y nitratos

Los siguientes parámetros necesarios para caracterizar el influente de la EDAR son la concentración de nitrógeno total (N<sub>T</sub>), la de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y la de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). En la Figura 13 y Figura 14 se muestra su evolución histórica de acuerdo con los datos de la Tabla X.

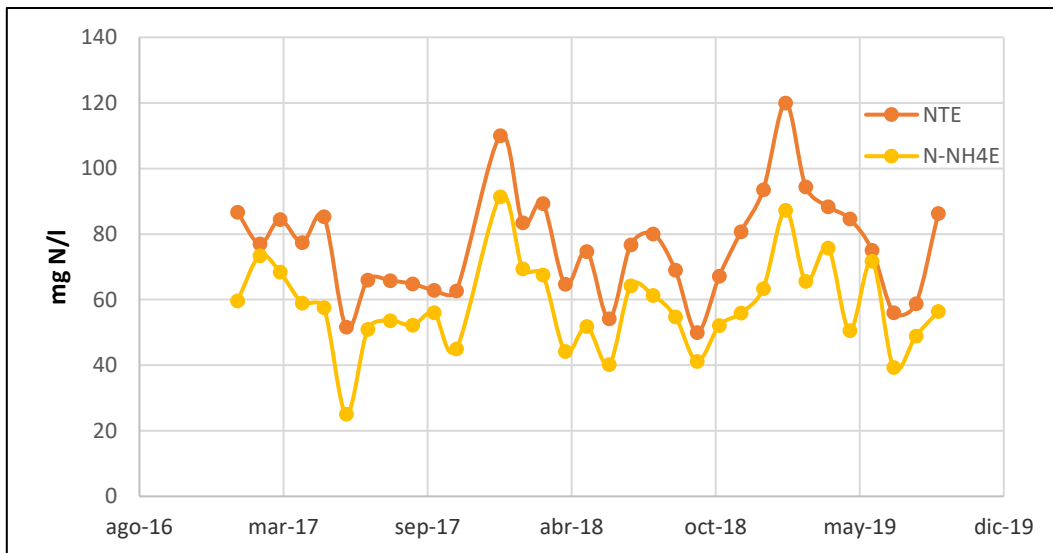


Figura 13. Evolución histórica de la concentración N<sub>T</sub> y N-NH<sub>4</sub> del influente de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: ABAQUA).

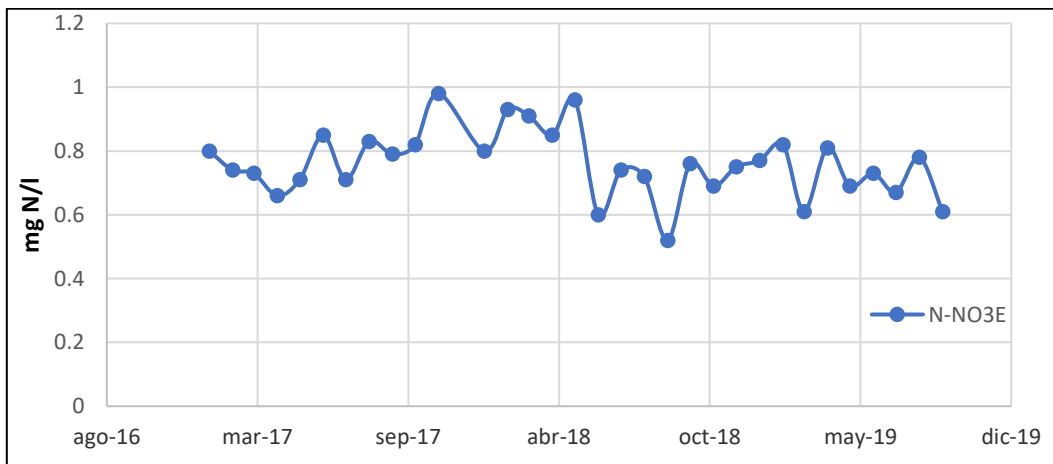


Figura 14. Evolución histórica de la concentración de N-NO<sub>3</sub> del influente de la EDAR Sa Pobra (FUENTE: ABAQUA).

En lo que respecta a la concentración de nitrógeno total del influente, ésta se encuentra en el rango de 50-120 mg N/l. Como se puede apreciar en la Figura 12, no parece existir una tendencia estacional. Sin embargo, existen 2 picos de concentración, uno en enero de 2018 y otro en febrero de 2019. Aunque a simple vista no parece haber ningún *outlier* claro, se realizará de nuevo el test de Tukey para comprobarlo.

Respecto a la concentración de amonio del influente, ésta oscila en el rango de 25-92 mg N-NH<sub>4</sub>/l. A simple vista parece haber un valor anómalo (junio 2017), por lo que también se comprobará mediante tratamiento estadístico. Tampoco parece que exista una tendencia estacional.

En el caso de los nitratos, su concentración es considerablemente más baja que la de amonio, como cabe esperar, situándose en el rango de 0,50-1,00 mg N-NO<sub>3</sub>/l. Como se puede apreciar en la Figura T, existen considerables fluctuaciones en los valores de un mes a otro, por lo que no parece seguir una tendencia estacional. Resulta complicado distinguir posibles *outliers*, pero se someterá igualmente al test de Tukey para corroborar que no exista ninguno.

Como se ha comentado, se va a estudiar la presencia de valores atípicos aplicando de nuevo el test de Tukey. En la Tabla 11 se muestran los cálculos de los límites para determinar si un valor es atípico leve o extremo:

**Tabla 11.** Cuartiles, rango intercuartílico y límites a partir de los que los valores se consideran anómalos en las series históricas de N<sub>T</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

	N <sub>T</sub> (mg N/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/l)
Q <sub>1</sub>	64,75	50,80	0,70
Q <sub>3</sub>	85,80	66,60	0,82
IRQ (Q <sub>3</sub> - Q <sub>1</sub> )	21,05	15,80	0,12
Límite superior leve	117,375	90,30	1,00
Límite superior extremo	148,95	114,00	1,18
Límite inferior leve	33,175	27,10	0,52
Límite inferior extremo	1,60	3,40	0,34

Una vez calculados los límites, revisando los valores de la Tabla 6 se han encontrado dos valores atípicos en la concentración de amonio y uno en la de nitrógeno total. Sin embargo, dado que ninguno es extremo, se ha decidido conservarlos. Por tanto, se calculan los promedios para obtener la concentración media en el agua residual que llega a la planta depuradora, los cuales serán idénticos para verano e invierno al no haber hallado una tendencia estacional. Estos valores se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12.** N<sub>T</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del influente de entrada a la EDAR.

N <sub>T</sub> (mg N/l)	76,30
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	57,94
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/l)	0,76

#### 4.5. Fósforo total y ortofosfatos.

A continuación se analizará la concentración de fósforo total (P<sub>T</sub>) y la de ortofosfatos (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>) para obtener el valor promedio de los mismos con el que diseñar la EDAR. Con los datos de la Tabla 6 se construye la Figura 14:



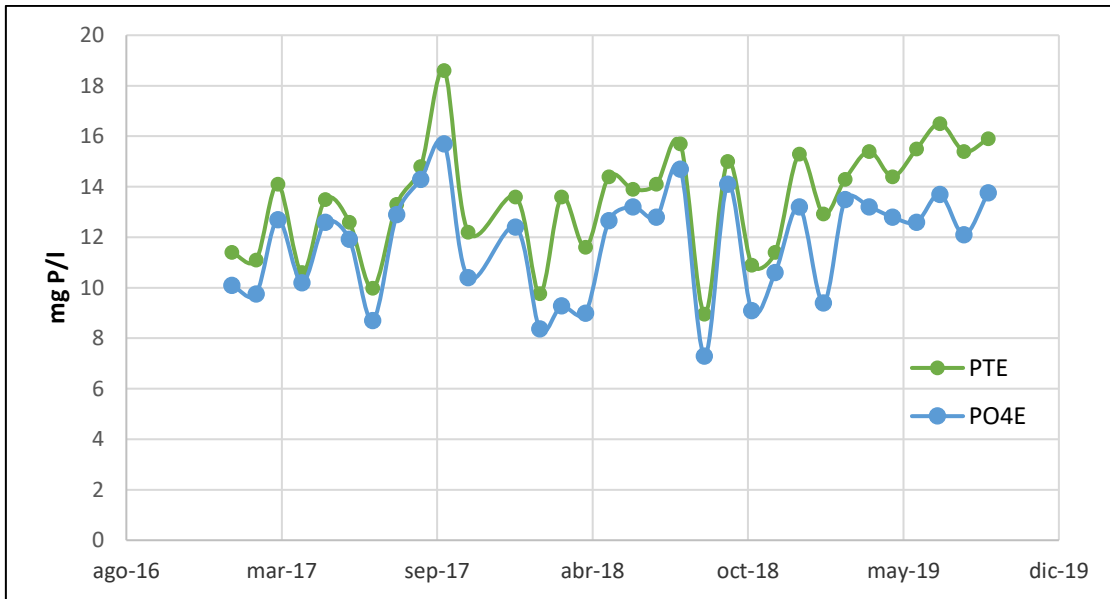


Figura 15. Evolución histórica de la concentración de  $P_T$  y  $PO_4$  del influente de la EDAR Sa Pobra. (FUENTE: ABAQUA).

En lo que respecta a la concentración de fósforo, parece oscilar en el rango de 8,9-18,7 mg P/l, mientras que en el caso de los fosfatos es algo menor, entre los 7,2 mg P/l y los 15,8 mg P/l. Ambas parecen seguir la misma tendencia, lo cual es esperable, exceptuando los valores medidos en abril del 2019. Sin embargo, ninguna parece ser estacional, existiendo notables fluctuaciones de un mes a otro. A simple vista parece haber dos valores que podrían ser *outliers*, por lo que se va a aplicar el test de Tukey. Los valores de los límites que determinan si un valor es atípico extremo o leve se encuentran reflejados en la Tabla 13.

Tabla 13. Cuartiles, rango intercuartílico y límites a partir de los que los valores se consideran anómalos en las series históricas de  $P_T$  y  $PO_4$ .

	$P_T$ (mg P/l)	$PO_4^{-3}$ (mg P/l)
Q <sub>1</sub>	11,50	9,93
Q <sub>3</sub>	13,75	13,2
IRQ (Q <sub>3</sub> - Q <sub>1</sub> )	2,25	3,27
Límite superior leve	17,125	18,105
Límite superior extremo	20,50	23,01
Límite inferior leve	8,125	5,025
Límite inferior extremo	4,75	0,12

Una vez calculados los límites, sólo se ha encontrado un valor atípico en la serie de concentración de fósforo total. Sin embargo, como se trata de un valor anómalo leve se ha considerado conservarlo. En la Tabla 14 se muestran los valores promedio que se usarán en el diseño de la EDAR, que serán utilizados tanto para condiciones de verano como de invierno dado que no se ha encontrado en las series una tendencia estacional debido a la disparidad de valores de un mes a otro.

Tabla 14.  $P_T$  y  $PO_4$  del influente de entrada a la EDAR.

$P_T$ (mg P/l)	13,50
$PO_4^{-3}$ (mg P/l)	11,78

#### 4.6. Caracterización completa del agua residual

Una vez descartados los valores atípicos, con los datos proporcionados por la Agencia Balear del Agua y Calidad Ambiental se obtienen los siguientes parámetros del influente para el diseño de la depuradora de Sa Pobra:

**Tabla 15.** Caracterización del agua residual de entrada a la EDAR Sa Pobra (Fuente: ABAQUA).

Parámetro	Invierno	Verano
DQO (mg/l)	946,50	946,50
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	484,60	484,60
SS (mg/l)	429,35	429,35
N <sub>T</sub> (mg N/l)	76,30	76,30
NH <sub>4</sub> (mg N/l)	57,94	57,94
NO <sub>3</sub> (mg N/l)	0,76	0,76
PT (mg P/l)	13,50	13,50
PO <sub>4</sub> (mg P/l)	11,78	11,78
Ácidos volátiles (mg HAc/l)	45,00	45,00
Alcalinidad	330,00	330,00
pH	7,30	7,30

Como se puede apreciar, no se dispone de una caracterización completa del influente. Para poder calcular el resto de los parámetros necesarios, es preciso conocer las relaciones típicas entre los parámetros de un agua residual típica. En la Tabla 16 se muestran los hipótesis asumidas de dichas relaciones:

**Tabla 16.** Hipótesis consideradas para la caracterización del efluente (Fuente: Sánchez Ramírez, 2008).

Relación	Valor	Unidades
DQO <sub>sol</sub> : DQO	0,42	mg DQO : mg DQO
DBO <sub>5</sub> : DBO <sub>lim</sub>	0,70	mg DBO : mg DBO
DBO <sub>lim, sol</sub> : DBO <sub>lim</sub>	0,50	mg DBO : mg DBO
DBO <sub>5, sol</sub> : DBO <sub>5</sub>	0,50	mg DBO : mg DBO
SSV : SST	0,79	mg SSV : mg SST
N <sub>T, sol</sub> : N <sub>T</sub>	0,82	mg N : mg N
P <sub>T, sol</sub> : P <sub>T</sub>	0,88	mg P : mg P

Para calcular los componentes restantes del modelo, se han aplicado las siguientes ecuaciones:

$$S_I = DQO_{sol} - DBO_{lim, sol} \quad \text{Ec. 2}$$

$$S_F = DBO_{lim, sol} - S_A - S_{PRO} \quad \text{Ec. 3}$$

$$X_I = DQO_{susp} - DBO_{lim, susp} \quad \text{Ec. 4}$$

$$X_S = DBO_{lim, susp} \quad \text{Ec. 5}$$

$$SSVB = SSV \cdot (DBO_{lim, susp} / DQO_{susp}) \quad \text{Ec. 6}$$

Finalmente, se asume que todos los ácidos volátiles que llegan a la EDAR son ácido acético ( $S_A$ ), por lo que no hay propiónico ( $S_{PRO} = 0$ ). Por tanto, aplicando las ecuaciones descritas anteriormente y las hipótesis supuestas en la Tabla X, se ha caracterizado completamente el agua residual que llega a la depuradora de Sa Pobra. Estos parámetros, detallados en la Tabla Y, son los que se introducirán en el software DESASS.

**Tabla 17.** Caracterización completa del influente de la EDAR Sa Pobra.

Parámetro	Valor	Unidades
DQO	946,50	mg O/l
% DQO <sub>sol</sub>	42,00	–
DQO <sub>sol</sub>	397,53	mg O/l
DQO <sub>susp</sub>	548,97	mg O/l
DBO <sub>5</sub>	484,60	mg O/l
% DBO <sub>5,sol</sub>	50,00	–
DBO <sub>5,sol</sub>	242,30	mg O/l
DBO <sub>lim</sub>	692,30	mg O/l
% DBO <sub>lim,sol</sub>	50,00	–
DBO <sub>lim,sol</sub>	346,20	mg O/l
DBO <sub>lim,susp</sub>	346,20	mg O/l
SST	429,35	mg/l
% SSV	79,00	–
SSV	339,19	mg/l
SSNV (X <sub>NV</sub> )	90,16	mg/l
SSVB	213,91	mg/l
SSNVB	125,28	mg/l
N <sub>T</sub>	76,30	mg N/l
% N <sub>T,sol</sub>	82,00	–
N <sub>T,sol</sub>	62,60	mg N/l
N <sub>T,susp</sub>	13,70	mg N/l
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	57,94	mg N/l
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,76	mg N/l
P <sub>T</sub>	13,50	mg P/l
% P <sub>T,sol</sub>	88,00	–
P <sub>T,sol</sub>	11,88	mg P/l
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	11,78	mg P/l
S <sub>I</sub>	51,38	mg DQO/l
X <sub>I</sub>	202,82	mg DQO/l
X <sub>S</sub>	346,15	mg DQO/l
S <sub>A</sub>	48,00	mg DQO/l
S <sub>F</sub>	298,15	mg DQO/l
S <sub>PRO</sub>	0,00	mg DQO/l
Alcalinidad	330,00	mg CaCO <sub>3</sub> /l
pH	7,30	–

Una vez caracterizado el influente, se suponen las constantes estequiométricas (i) del modelo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$N_{T,sol} = S_{NH4} + S_{NO3} + S_F \cdot i_{NSF} + S_I \cdot i_{NSI} + S_A \cdot i_{NSA} \quad \text{Ec. 7}$$

$$P_{T,sol} = S_{PO4} + S_F \cdot i_{PSF} + S_I \cdot i_{PSI} + S_A \cdot i_{PSA} \quad \text{Ec. 8}$$

$$N_T - N_{T,sol} = X_S \cdot i_{NXS} + X_I \cdot i_{NXI} \quad \text{Ec. 9}$$

$$P_T - P_{T,sol} = X_S \cdot i_{PXS} + X_I \cdot i_{PXI} \quad \text{Ec. 10}$$

$$SS_T = X_{NV} + X_S \cdot i_{SSTXS} + X_I \cdot i_{SSTXI} + (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) \cdot i_{SSTBM} + X_{PHA} \cdot 0,6 + X_{PP} \cdot 3,23 \quad \text{Ec. 11}$$

Para simplificar el cálculo, se asume que la concentración de bacterias y otros microorganismos en el agua de entrada es despreciable ( $X_H=X_{AUT}=X_{PAO}=X_{PHA}=X_{PP}=0$ ) además, el ácido acético no contiene nitrógeno ni fósforo, por lo que  $i_{NSA}$  e  $i_{PSA}$  son nulos. Las condiciones para el cálculo de las constantes son las siguientes:

- $i_{NXS} \geq i_{NSF}$
- $i_{PXS} \geq i_{PSF}$
- $i_{SSTXI} \approx i_{SSTXS}$
- $i_{PSI}$  tiende a 0.

Con las ecuaciones anteriores, se calculan las constantes para que cumplan las condiciones descritas. Las constantes obtenidas se muestran en la Tabla 18:

**Tabla 18.** Constantes estequiométricas calculadas para la caracterización del influente de la EDAR.

$i_{NSI}$	0,00204
$i_{NSF}$	0,01271
$i_{NXI}$	0,01531
$i_{NXS}$	0,03061
$i_{PSI}$	0,00000
$i_{PSF}$	0,00040
$i_{PXI}$	0,00178
$i_{PXS}$	0,00358
$i_{SSTXI}$	0,61786
$i_{SSTXS}$	0,61786

Una vez calculadas las constantes estequiométricas, se introducen en DESASS junto con los valores de la caracterización obtenidos anteriormente. Para el resto de las constantes estequiométricas, se utilizarán las calculadas por DESASS.

Datos Analíticos (mg/l)					
<b>DQO</b>					
DQO	946.5	mgDQO/l	%Sol	42.0	%
DQOsol	397.5	mgDQO/l			
<b>DBO</b>					
DBO5	484.6	mgDBO/l	%Sol	50.0	%
DBO5sol	242.3	mgDBO/l			
DBOlim	692.3	mgDBO/l	%Sol	50.0	%
DBOlim sol	346.2	mgDBO/l			
<b>SST</b>					
SST	429.4	mg/l	%SSV	79.0	%
SSV	339.2	mg/l			
<b>Nitrógeno</b>					
Ntot	76.3	mgN/l	%Sol	82.0	%
Ntot S	62.6	mgN/l			
NH4	57.9	mgN/l	NO3	0.8	mgN/l
Ntot Sp	13.7	mgN/l			
<b>Fosforo</b>					
Ptot	13.5	mgP/l	%Sol	88.0	%
Ptot S	11.9	mgP/l			
PO4	11.8	mgP/l			
Alcalinid.	330.0	mgHCO3/l			
pH	7.3				
AGV	45.0	mgHAc/l			

**Figura 16.** Datos analíticos introducidos en DESASS.

Dotaciones y Temperatura			Cargas	Sedimentabilidad	Precipitados	
	Soluble (mg/l)				Suspendida (mg/l)	
	Invierno	Verano			Invierno	Verano
So2	0.01	0.01	mgDQO/l	Xi bm		
Sf	298.24	298.24	mgDQO/l	Xio	202.90	202.90
Sa	47.96	47.96	mgDQO/l	Xs	346.10	346.10
Snh4	57.90	57.90	mgN/l	Xh		
Sno3	0.80	0.80	mgN/l	Xpao		
Sno2			mgN/l	Xpp		
Spo4	11.80	11.80	mgP/l	Xpha		
Si	51.30	51.30	mgDQO/l	Xamm		
Salk	250.26	250.26	mgCaCO3/l	Xamm-r		
Sn2	15.94	13.93	mgN/l	Xnit		
Spro			mgDQO/l	Xaut		
Sh2			mgDQO/l	Xacid		
Sch4			mgDQO/l	Xpro		
Sco2	0.56	0.52	mmol C/l	Xmac		
Sca			mg/l	Xmh2		
Smg			mg/l	Xmeoh		
Sk			mg/l	Xnep		
Sfe			mg/l	Xsrb-h		
Sal			mg/l	Xsrb-a		
Sso4			mgS/l	Xtss	429.41	429.41
Shs			mgS/l	Xnv	90.20	90.20

Figura 17. Componentes del influente del modelo de la EDAR en DESASS.

Nitrógeno		Fosforo		Carbono	
Insi	0.00204	lpsi	0.00000	lcsi	0.03000
Insf	0.01271	lpsf	0.00040	lcsf	0.02700
Inxi	0.01531	lpxi	0.00179	lcxi	0.03000
Inxibm	0.03000	lpxibm	0.01000	lcxs	0.02700
Inxs	0.03061	lpxs	0.00358	lcbm	0.03100
Inbm	0.07000	lpbm	0.02000		

Azufre		SST		Calcio	
Issi	0.00010	ltssxi	0.61786	lcasi	0.00000
Issf	0.00010	ltssxibm	0.70000	lcaf	0.00000
Isxi	0.00010	ltssxs	0.61786	lcaxi	0.00000
Isxs	0.00010	ltssbm	0.70000	lcaxs	0.00000
Isbm	0.00010			lcabm	0.00350

Potasio		Magnesio		Hierro	
lkxpp	0.35000	lmgxpp	0.28000	lfesi	0.00000
lksi	0.00080	lmgfi	0.00150	lfesf	0.00000
lkxf	0.00080	lmgxf	0.00150	lfexi	0.00000
lkxi	0.00080	lmgxi	0.00150	lfexs	0.00000
lkxs	0.00080	lmgxs	0.00150	lfesbm	0.00000
lkbm	0.00080	lmgbm	0.00150		

Figura 18. Constantes estequiométricas utilizadas en el modelo de la EDAR en DESASS.

#### 4.7. Límites de vertido

El último paso antes de poder comenzar con la simulación de las alternativas es establecer los límites de vertido de la depuradora. De acuerdo con lo establecido en la autorización de vertido de la EDAR Sa Pobra de 2005, proporcionada por el Govern de le Illes Balears (GOIB), se establecen los siguientes requisitos mínimos de calidad del agua vertida por la depuradora, así como la periodicidad de los controles necesario. Estos límites se muestran en la Tabla 19:

**Tabla 19.** Requisitos mínimos de calidad del agua de vertido de la EDAR y periodicidad de los controles (FUENTE: Autorización de vertido, GOIB, 2005).

Parámetro	Valor límite	Controles
DBO <sub>5</sub>	25 mg/l	Quincenal
SS	15 mg/l	Quincenal
N total	30 mg/l	Mensual
N-NH <sub>4</sub>	20 mg/l	Mensual
P total	2 mg/l	Mensual

Sin embargo, la normativa aplicable al tratamiento de aguas residuales urbanas tanto a nivel europeo y estatal (Directiva 2000/60/CE y RD 509/1996) como la normativa autonómica (Decreto 49/2003), establecen otros valores límite de concentración, reflejados en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Valores límite de vertido según la legislación vigente.

Parámetro	Valor límite
DBO <sub>5</sub>	25 mg/l
DQO	125 mg/l
SS	35 mg/l
N total	15 mg/l
N-NH <sub>4</sub>	4 mg/l
P total	2 mg/l

Como se puede apreciar, la legislación es más restrictiva en algunos parámetros respecto a la autorización de vertido, mientras que en otros como la concentración de sólidos se da la situación inversa. Por tanto, para el diseño de la nueva estación depuradora se ha decidido aplicar los límites de concentración más restrictivos para cada parámetro, resultando en los siguientes:

**Tabla 21.** Valores límite de vertido asumidos para el diseño de la EDAR Sa Pobra.

Parámetro	Valor límite
DBO <sub>5</sub>	25 mg/l
DQO	125 mg/l
SS	15 mg/l
N total	15 mg/l
N-NH <sub>4</sub>	4 mg/l
P total	2 mg/l

## 5. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO PROPUESTAS PARA LA EDAR SA POBLA

Este trabajo se centra en la elección de la mejor simulación obtenida en el diseño de la EDAR que cumpla con los requisitos de vertido y resulte más viable económicamente. A continuación se describe cada una de las alternativas que se va a simular mediante el software DESASS.

### 5.1. ALTERNATIVA 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo.

La oxidación total consiste en un sistema tradicional de fangos activados de carga másica baja cuyo tiempo de retención sea lo suficientemente prolongado para lograr la estabilización del fango, es decir, que el porcentaje de sólidos suspendidos volátiles biodegradables sea inferior al 35%. Al estabilizar el fango en la línea de aguas, este tipo de sistemas no precisan de decantadores primarios ni de digestores en la línea de fangos, lo que simplifica considerablemente el diseño de la planta. Además, la producción de fango es notablemente baja, debido a los elevados tiempos de retención. Sin embargo, esto provoca la necesidad de volúmenes de reactor biológico muy elevados, lo que a su vez conlleva una necesidad elevada de aireación, provocando un considerable consumo energético.

Por otro lado, dada la elevada concentración de nutrientes, se ha decidido optar por una configuración A<sup>2</sup>/O para el reactor biológico, en el que una parte considerable del volumen del reactor se destina a la zona anaerobia para favorecer el crecimiento de las bacterias PAO, mientras que la recirculación interna entre la zona aerobia y la anóxica facilita el proceso de nitrificación-desnitrificación, al permitir a las bacterias facultativas de la zona anóxica eliminar los nitratos producidos en la zona aerobia.

La simulación de la oxidación total se ha realizado como varios reactores en serie, en este caso, dos anaerobios, uno anóxico y cuatro aerobios (Figura 19). Se ha seleccionado un 38% de zona anaerobia, un 18% de zona anóxica y el 44% restante como zona aerobia. La recirculación interna se ha tenido que programar al máximo (400% del caudal de entrada) para priorizar la eliminación de nitrógeno, cumpliendo los requisitos de vertido, y evitar problemas de flotación por concentraciones excesivas de nitratos, a expensa de un mayor coste energético.

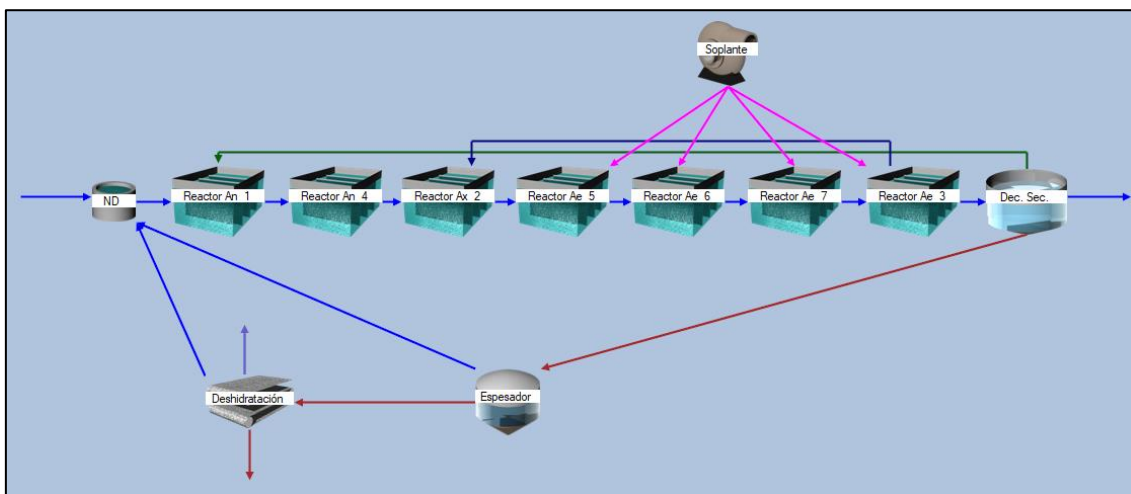


Figura 19. Esquema de tratamiento de la alternativa 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo.

## 5.2. ALTERNATIVA 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo.

Para la alternativa 2, se ha decidido utilizar un sistema tradicional de fangos activos con digestión aerobia de fangos. Al contrario que en la alternativa 1, la estabilización del fango no se logra en el reactor biológico, por lo que se precisa de un tratamiento de digestión en la línea de fangos. Este tipo de esquemas precisa de volúmenes considerablemente más reducidos en el reactor biológico, a expensas de la necesidad de un decantador primario y de otro recinto biológico adicional para la digestión.

A pesar de las ventajas de los sistemas de digestión anaerobia, supone una complejidad técnica y un coste económico considerablemente elevado para una EDAR de tamaño relativamente pequeño como la de Sa Pobra ( $\ll 35.000$  h-eq). Por tanto, el tratamiento de digestión escogido es aerobio.

Respecto a la eliminación de nutrientes, el nitrógeno se eliminará de manera biológica en el reactor mediante el uso de un esquema Ludzack-Ettinger modificado. Este sistema consta de un reactor anóxico seguido de uno aerobio, con una recirculación interna que permite llevar los nitratos producidos en el aerobio al anóxico para que las bacterias facultativas realicen la desnitrificación. El fósforo se eliminará por precipitación química con cloruro férrico.

Este sistema se simulará mediante ocho reactores en serie, siendo los dos primeros anóxicos y los otros seis aerobios. La precipitación química se simulará mediante la adición de cloruro férrico en el último reactor aerobio.

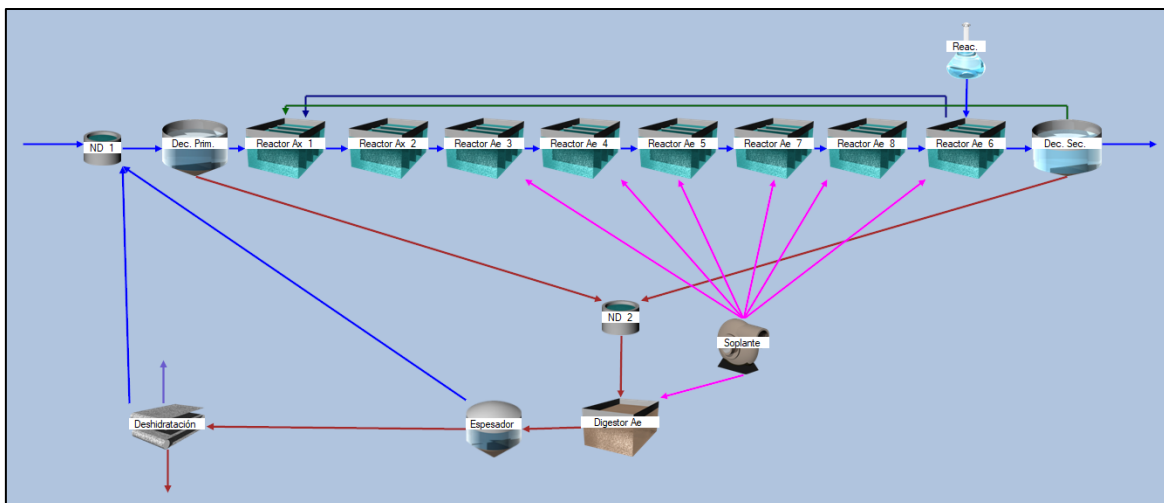


Figura 20. Esquema de tratamiento de la alternativa 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo.

## 5.3. ALTERNATIVA 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo.

Al igual que en la alternativa 1, se ha optado por un sistema de oxidación total. Sin embargo, en este caso la eliminación de fósforo se realizará por precipitación química con la adición de cloruro férrico. Por tanto, se ha decidido no instalar reactores anaerobios, sino que el reactor biológico seguirá un modelo de nitrificación-desnitrificación con recirculación interna (esquema Ludzack-Ettinger modificado). De este modo, los nitratos producidos en el reactor aerobio pueden ser consumidos por las bacterias facultativas en el anóxico.



De nuevo, al tratarse de oxidación total se logra la estabilización del fango sin necesidad de una etapa de digestión, por lo que se simplifica notablemente la línea de fangos a cambio de la necesidad de un volumen de reactor biológico muy elevado. A su vez, se simplifica también la línea de aguas al no precisar de una decantación primaria previa al reactor biológico.

La simulación de este sistema se ha realizado con una serie de seis reactores, siendo los dos primeros anóxicos y los cuatro restantes aerobios, con una recirculación interna entre el último reactor aerobio y el primer anóxico. La precipitación química se ha simulado mediante la adición de cloruro férrico en el último reactor aerobio, antes de la decantación secundaria.

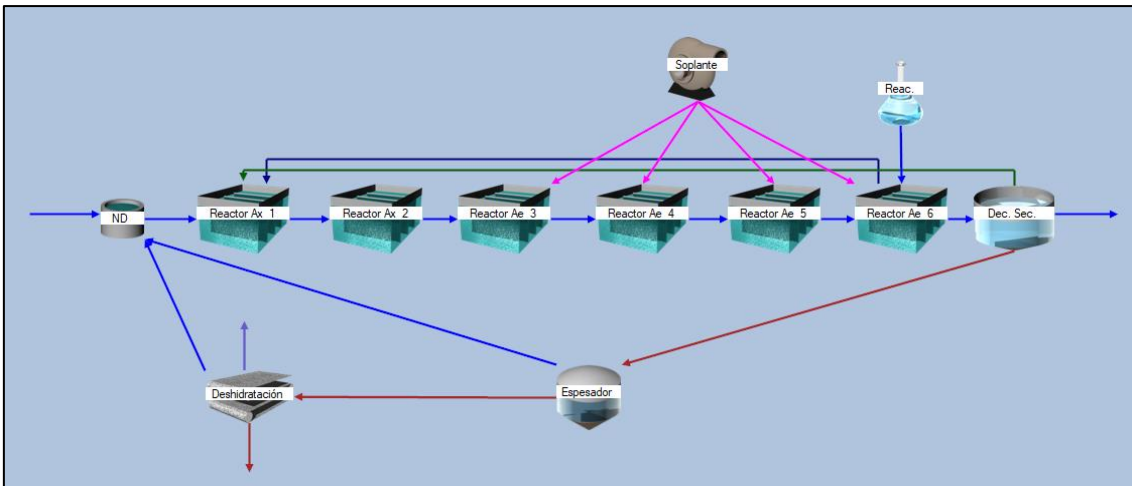


Figura 21. Esquema de tratamiento de la alternativa 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo.

## 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

En este apartado se exponen los resultados de las simulaciones realizadas mediante el software DESASS para cada una de las alternativas propuestas anteriormente. Dichos resultados se han obtenido intentando minimizar al máximo el volumen del reactor biológico, el gasto energético y el consumo de reactivos necesarios para cumplir con los requisitos de vertido de la Tabla X.

A continuación, se presenta el dimensionamiento de la etapa de pretratamiento, que es un elemento de diseño común a todas las alternativas.

### 6.1. Diseño del pretratamiento.

Para la etapa de pretratamiento, se ha optado por un canal de desbaste (más otro idéntico de reserva), con un set de rejillas mecánicas de gruesos y otras de finos seguidos de un desarenador aireado.

Para diseñar el canal, empezamos por las rejillas finas, buscando la menor superficie que cumpla las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \text{a } Q_{\text{med}} & \quad 0,6 < v < 1,0 \text{ m/s} \\ \text{a } Q_{\text{pta}} & \quad v < 1,4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Tomando por tanto el caudal de diseño de la planta ( $Q_{\text{med}} = 3.850 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{\text{pta}} = 4.620 \text{ m}^3/\text{d}$ ), se calcula la velocidad de paso en las condiciones más restrictivas:

**Tabla 22.** Áreas resultantes en las condiciones más restrictivas.

Condición	Área
a $Q_{\text{med}}$ , $v = 0,6 \text{ m/s}$	0,0743 $\text{m}^2$
a $Q_{\text{med}}$ , $v = 1 \text{ m/s}$	0,0446 $\text{m}^2$
a $Q_{\text{pta}}$ , $v = 1,4 \text{ m/s}$	0,0382 $\text{m}^2$

De las tres áreas tomamos la menor y comprobamos que se cumple la otra condición:

$$\text{Si } A = 0,0382 \text{ m}^2, \text{ a } Q_{\text{med}} v = 1,1667 \text{ m/s} > 1,0 \text{ m/s}$$

Por tanto, no nos sirve. Probamos con la siguiente área más pequeña:

$$\text{Si } A = 0,0446 \text{ m}^2, \text{ a } Q_{\text{pta}} v = 1,2 \text{ m/s} < 1,4 \text{ m/s}$$

En este caso sí que cumplimos ambas condiciones. Si suponemos que puede existir una colmatación del 30%, el área efectiva resultante es de  $0,0637 \text{ m}^2$ .

El siguiente paso es seleccionar el calado ( $h$ ) y el ancho ( $w$ ), de tal manera que la relación entre ambos se aproxime a la unidad ( $h/w=1$ ). Si suponemos un calado de  $0,32 \text{ m}$ , obtenemos un ancho de canal teórico ( $b$ ) de  $0,19893 \text{ m}$ . Calculamos el número de barrotes y espacios, escogiendo las condiciones de paso más restrictivas (barrotes de  $1 \text{ cm}$  de espesor y separación entre los mismos de  $1,5 \text{ cm}$ ),

$$n^{\circ} \text{ espacios} = \frac{b}{\text{separación entre barrotes}} \quad \text{Ec.12}$$

obteniendo un resultado de  $13,262$ , por lo que aproximando siempre por lo alto, obtenemos un total de  $14$  espacios entre barrotes. Por tanto, el  $n^{\circ}$  de barrotes será de  $13$ . Calculamos el ancho real usando la Ec. 13,

$$w = n^{\circ} \text{ espacios} \cdot \text{separación entre barrotes} + n^{\circ} \text{ barrotes} \cdot \text{espesor} \quad \text{Ec.13}$$

Obteniendo un ancho total de 0,34 m. Por tanto, la relación entre el calado y el ancho (h/w) es de 0,9412  $\approx$  1, por lo que se da por válido.

A continuación se calculan las pérdidas de carga. Dado que se trata de rejas mecánicas, se empleará la Ecuación de Rischmer (Ec. 14).

$$\Delta h = \beta \cdot \left(\frac{W}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \text{sen}\theta \quad \text{Ec.14}$$

donde:

- $\Delta h$  = pérdida de carga (m.c.a.)
- $\beta$  = factor de forma de la barra
- $W$  = ancho del canal (m)
- $b$  = espacio libre entre barras (m)
- $\theta$  = ángulo con la horizontal (rad)
- $v$  = velocidad antes de la reja (m/s)

Al tratarse de rejas de limpieza mecánica, el ángulo que deben formar con la horizontal suele estar en el rango de 45° a 90°. Respecto al factor de forma de la barra, se ha decidido tomar el más restrictivo, por lo que se han escogido barras de forma rectangular (Tabla Z).

**Tabla 23.** Valores del factor de forma de la barra.(FUENTE: Ferrer Polo, 2007)

Tipo de barra	$\beta$
Rectangular	2,42
Rectangular con la cara aguas arriba semicircular	1,83
Circular	1,79
Rectangular con las caras aguas arriba y abajo semicircular	1,67

Por tanto, aplicando la Ec. 14 se obtienen unas pérdidas de carga de 0,0566 m.c.a., considerablemente inferiores al límite usual de 0,40 m.c.a., por lo que se da por válido.

Para las rejas de gruesos, se escoge un espesor de barra de 1 cm y una separación entre barrotes de 5 cm. Se calcula el nº de barrotes necesario aplicando la Ec. 15,

$$W = (N + 1) \cdot \text{separación} + N \cdot \text{espesor} \quad \text{Ec.15}$$

donde:

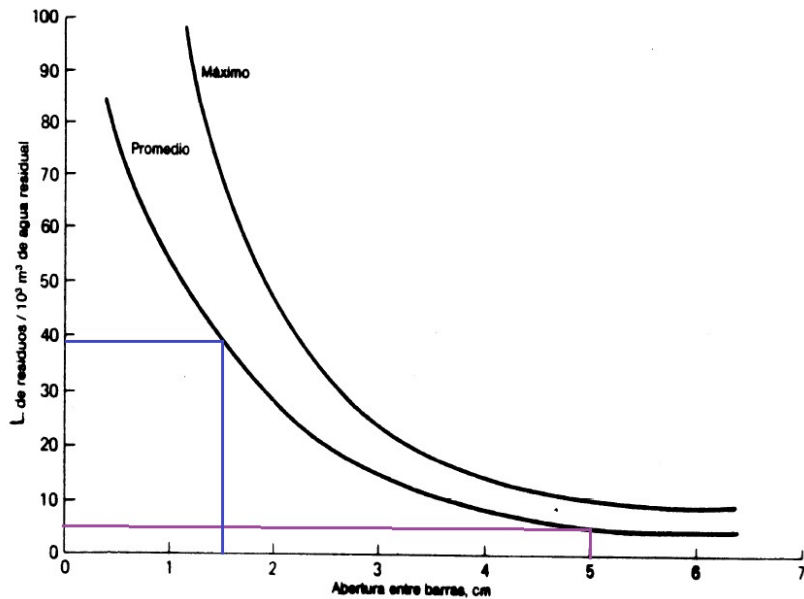
- $W$  = ancho del canal
- $N$  = número de barrotes

Aplicando la fórmula anterior, se obtiene que el número de barrotes necesario es de 4,833 barrotes, que aproximando al alta se queda en 5 barrotes. Se calcula el tamaño de los espacios de los laterales para comprobar que no sean excesivamente menores a la separación escogida:

$$\text{espacio lateral} = \frac{W - [N \cdot \text{espesor} + (N-1) \cdot \text{separación}]}{2} \quad \text{Ec.16}$$

El resultado obtenido es de 4,5 cm de separación en los extremos. Como no son notablemente inferiores al espacio de separación entre barrotes, se toma por válido.

A continuación, se calcula el volumen de sólidos retenidos por día en las rejas (Figura 22) a efectos de conocer la generación de residuos en la etapa de desbaste que deberán ser llevados a vertedero.



**Figura 22.** Volumen de residuos por volumen de agua residual retenidos por las rejillas dependiendo de la separación entre sus barrotes.(FUENTE: Ferrer Polo, 2007)

De acuerdo con la Figura W, en las rejillas de gruesos se retienen unos  $6 \cdot 10^{-3}$  l/m<sup>3</sup> de agua residual, mientras que en las de finos se retienen unos  $39 \cdot 10^{-3}$  l/m<sup>3</sup>. Multiplicando por el caudal medio diario del influente, se obtienen 0,17325 m<sup>3</sup>/d de residuos sólo en la etapa de desbaste.

Finalmente, se dimensiona el desarenador aireado. Este tratamiento de sedimentación permite la eliminación de gravas y arenas, protegiendo los elementos posteriores. Al estar aireado, permite controlar el tamaño de las partículas que sedimentan variando el caudal de aire, además de mejorar la calidad del agua residual que llega al biológico oxidando los sulfuros. A su vez, permite la eliminación de grasas a tiempos de retención cercanos a 15 min. Para su dimensionamiento se siguen los criterios de la Tabla 24.

**Tabla 24.** Criterios de diseño del desarenador aireado.(FUENTE: Ferrer Polo, 2007)

Características	Valor	
	Intervalo	Típico
Dimensiones:		
Profundidad (h), m	2 - 5	
Longitud (L), m	7,5 - 20	
Ancho (a), m	2,5 - 7,0	
Relación ancho-profundidad	1:1 - 5:1	2:1
Relación ancho-longitud	3:1 - 4:1	3:1
Tiempo retención a caudal punta, min	2 - 5	3
Suministro de aire Nm <sup>3</sup> /min·m de longitud	0,15 - 0,45	0,3
Suministro de aire Nm <sup>3</sup> /h·m <sup>3</sup> de tanque	0,5 - 2,0	1,0
Cantidades de arena y espumas:		
Arena, m <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	0,004 - 0,020	0,015
Espumas, ml/m <sup>3</sup>	7,5 - 45	25

En condiciones de caudal punta, el tiempo de retención ha de ser mayor o igual a 3 minutos, por lo que se necesita un volumen mínimo de desarenador de 9,625 m<sup>3</sup>. Suponemos un metro y medio de ancho y de profundo, y cinco metros de largo (h=1,5 m, L=5 m y a=1,5 m). Con estas

dimensiones de desarenador se obtiene un volumen de  $11,25 \text{ m}^3$ , superior al mínimo necesario. Comprobamos que las relaciones entre las dimensiones se encuentren dentro del intervalo:

$$a/h = 1,5/1,5 = 1 : 1$$

$$L/a = 5/1,5 = 3,33 : 1$$

Finalmente, se comprueba el tiempo de retención a caudal punta, que en este caso es de 3,5 min, mayor que el mínimo requerido. Por tanto, se da el diseño por válido.

## 6.2. Resultados simulación alternativa 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo

Los parámetros de diseño de todas las unidades de tratamiento se han obtenido para las condiciones más desfavorables, que en este caso al no haber variación estacional del caudal del diseño se trata de la temporada de invierno, dado que al tener el influente una temperatura más baja, disminuye la actividad de las bacterias, dificultando el proceso de nitrificación. Posteriormente, se ha comprobado el funcionamiento de la EDAR en las condiciones de la temporada de verano.

A continuación, en la Tabla 25 se presentan los criterios de diseño y la calidad del efluente de la alternativa 1, correspondiente con la configuración mostrada en la Figura 19.

**Tabla 25.** Criterios de diseño, calidad del efluente y calidad del fango deshidratado de la alternativa 1: Oxidación total con eliminación biológica de fósforo.

Parámetro	Invierno	Verano
<b>Reactor de Fango Activados</b>		
Nº Reactores	7	
V <sub>reactor</sub> (m <sup>3</sup> )	7.700	
TRC (d)	18	13
% V <sub>anaerobio</sub>	38,0	
% V <sub>anóxico</sub>	18,0	
% V <sub>aerobio</sub>	44,0	
X <sub>SST</sub> (mg/l)	3.468,23	2.500,57
X <sub>H</sub> (mg/l)	731,15	445,67
X <sub>AUT</sub> (mg/l)	48,99	26,45
R.I. (Q <sub>ext</sub> /Q <sub>entr</sub> )	4,00	
Q <sub>RI</sub> (m <sup>3</sup> /d)	16.197,17	16.514,76
<b>Decantación Secundaria</b>		
Nº Decantadores	2	
Diámetro (m)	14,80	
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,500	0,500
Q <sub>sal.fango</sub> (m <sup>3</sup> /d)	204,87	284,25
X <sub>SST,sal fango</sub> (mg/l)	6.892,38	4.967,47
Q <sub>recirculación</sub> (m <sup>3</sup> /d)	3.639,56	3560,19
<b>Calidad del Efluente</b>		
DQO <sub>T</sub> (mg DQO/l)	69,11	66,71
DBO <sub>5</sub> (mg DBO/l)	0,49	0,34
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	0,80	0,23

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/l)	7,97	8,1
N <sub>T</sub> (mg N/l)	9,42	8,85
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg P/l)	1,43	0,25
P <sub>T</sub> (mg P/l)	1,91	0,69
X <sub>SST</sub> (mg/l)	14,45	11,92
pH	7,35	7,4
<b>Espesador de fangos</b>		
Diámetro (m)	8,50	
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,50	0,50
Concentr. Fango (Kg SS/m <sup>3</sup> )	9,87	9,87
<b>Deshidratación mecánica</b>		
X <sub>SST</sub> (mg/l)	250.000,00	
Q <sub>fangos</sub> (m <sup>3</sup> /d)	5,58	5,56
% SSV	68,6	67,1
% SSVB	34,7	31,9

Respecto al funcionamiento de la decantación secundaria, en la Figura 23 se puede observar el perfil de sólidos suspendidos (SS) en los decantadores. Como se puede apreciar, la altura del manto de fangos se encuentra por debajo de los 2 m tanto en invierno como en verano, por lo que los decantadores no se encuentran desbordados.

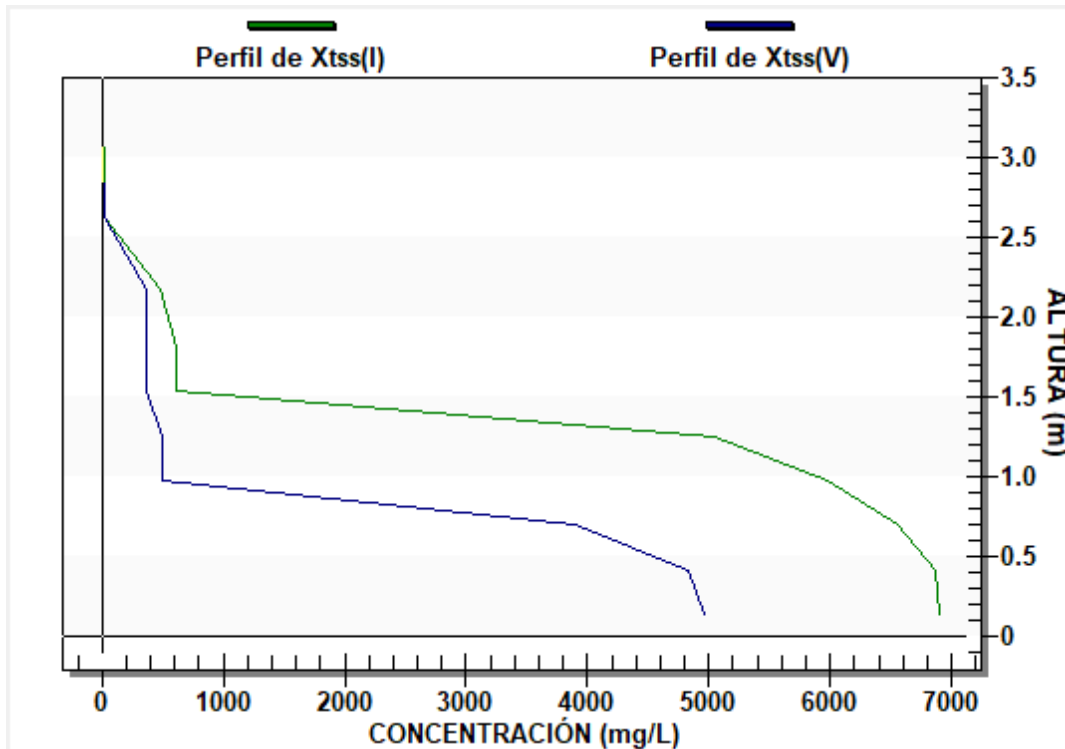


Figura 23. Perfil de SS de los decantadores secundarios de la Alternativa 1.

Respecto a las necesidades de aireación y el sistema de soplantes, se encuentran detallados en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Características de funcionamiento del sistema de soplantes requerido para la alternativa 1.

Sistema de aireación	
Necesidades O <sub>2</sub> reales en cond. punta (Kg/h)	104,9
Nº total difusores	832
Nº soplantes	3 (+ 1 reserva)
Marca-Modelo	LIGP - 25.20
Pmotor - Pads (kW)	37 - 31
Potencia instalada (kW)	111
Pot. Máx. utilizada (kW)	91,15
ΔP (mbar)	600
Consumo energético aproximado (kWh/día)	2.187,51

### 6.3. Resultados simulación alternativa 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo.

Al igual que en la alternativa 1, los parámetros de diseño de todas las unidades de tratamiento se han obtenido para las condiciones más desfavorables, es decir, las de invierno por la baja temperatura, y posteriormente se comprobaron para las condiciones de verano. En la Tabla 27 se detallan los criterios de diseño elegidos para la alternativa 2:

**Tabla 27.** Criterios de diseño, calidad del efluente y calidad del fango deshidratado de la alternativa 2: Fangos activos convencional con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química.

Parámetro	Invierno	Verano
<b>Reactor de Fango Activados</b>		
Nº Reactores	8	
V <sub>reactor</sub> (m <sup>3</sup> )	2.000	
TRC (d)	10	8
% V <sub>anóxico</sub>	20,0	
% V <sub>aerobio</sub>	80,0	
X <sub>SST</sub> (mg/l)	2882,45	2201,87
X <sub>H</sub> (mg/l)	1363,41	934,36
X <sub>AUT</sub> (mg/l)	115,02	69,42
R.I. (Q <sub>ext</sub> /Q <sub>entr</sub> )	4,00	
Q <sub>Ri</sub> (m <sup>3</sup> /d)	15.743,79	15.840,24
<b>Decantación primaria</b>		
Nº Decantadores	1	
Diámetro (m)	13,76	
Concentr. Fango (Kg SS/m <sup>3</sup> )	27,08	27,08
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,015	0,015
Q <sub>sal.fango</sub> (m <sup>3</sup> /d)	59,93	60,29
X <sub>SST,sal fango</sub> (mg/l)	27.224,80	27.075,57
<b>Decantación Secundaria</b>		
Nº Decantadores	2	
Diámetro (m)	14,50	
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,500	0,500

$Q_{\text{sal.fango}}$ ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	91,44	115,31
$X_{\text{SST,sal fango}}$ (mg/l)	5.736,75	4.381,34
$Q_{\text{recirculación}}$ ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	3.753,06	3.729,43
<b>Precipitación química</b>		
Caudal $\text{FeCl}_3$ ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	0,70	0,70
Concentración (mg $\text{FeCl}_3$ /l)	500.000	
<b>Calidad del Efluente</b>		
$\text{DQO}_T$ (mg DQO/l)	61,09	59,44
$\text{DBO}_5$ (mg DBO/l)	0,32	0,29
$\text{NH}_4^+$ (mg N/l)	1,49	0,20
$\text{NO}_3^-$ (mg N/l)	7,94	8,12
$\text{N}_T$ (mg N/l)	10,09	8,86
$\text{PO}_4^{3-}$ (mg P/l)	0,94	0,98
$\text{P}_T$ (mg P/l)	1,89	1,85
$X_{\text{SST}}$ (mg/l)	13,15	11,39
pH	6,52	6,62
<b>Digestor de fangos</b>		
V ( $\text{m}^3$ )	2.107,31	
TRH (d)	12	
$\text{O}_2$ disuelto a $Q_{\text{medio}}$ (mg/l)	1,00	
$X_{\text{SST}}$ (mg/l)	10.314,32	8.554,87
<b>Espesador de fangos</b>		
Diámetro (m)	8,50	
$Q_{\text{ext.fango}}/Q_{\text{ent}}$	0,50	0,50
Concentr. Fango ( $\text{Kg SS}/\text{m}^3$ )	17,05	17,05
<b>Deshidratación mecánica</b>		
$X_{\text{SST}}$ (mg/l)	250.000,00	
$Q_{\text{fangos}}$ ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	6,20	5,96
% SSV	61,1	59,2
% SSVB	30,4	23,1

Respecto al funcionamiento de la decantación, en las Figuras 24 y 25 se puede observar el perfil de sólidos suspendidos (SS) en el decantador primario y en los secundarios respectivamente. Como se puede apreciar, la altura del manto de fangos se encuentra por debajo de los 2 m tanto en invierno como en verano, por lo que los decantadores no se encuentran desbordados.



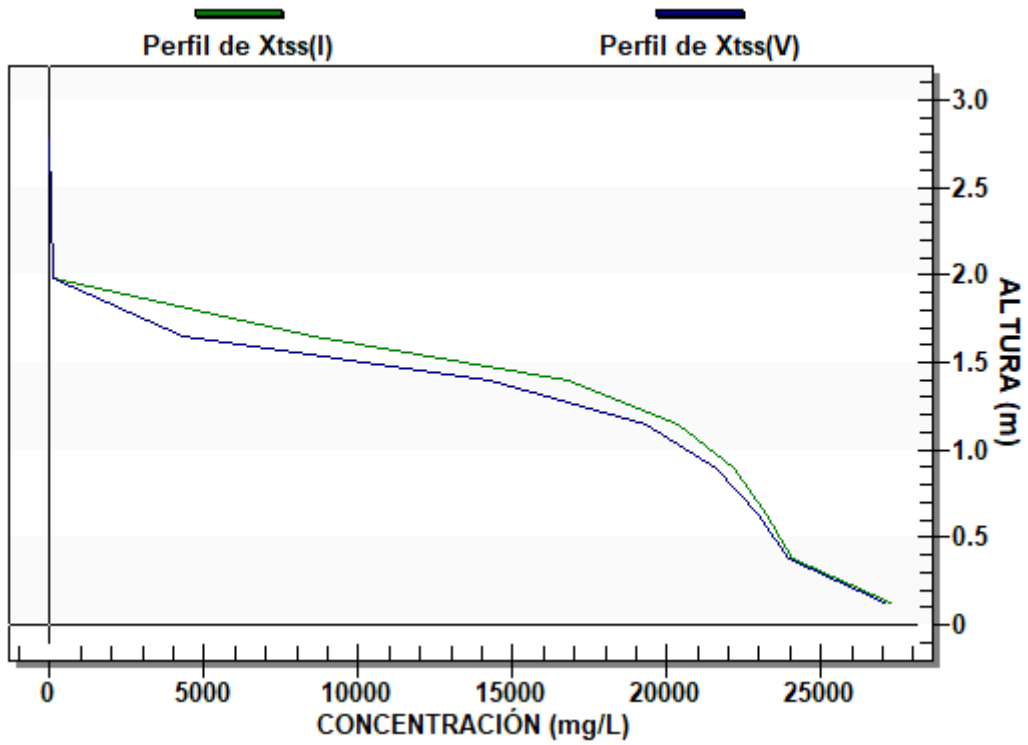


Figura 24. Perfil de SS del decantador primario de la Alternativa 2.

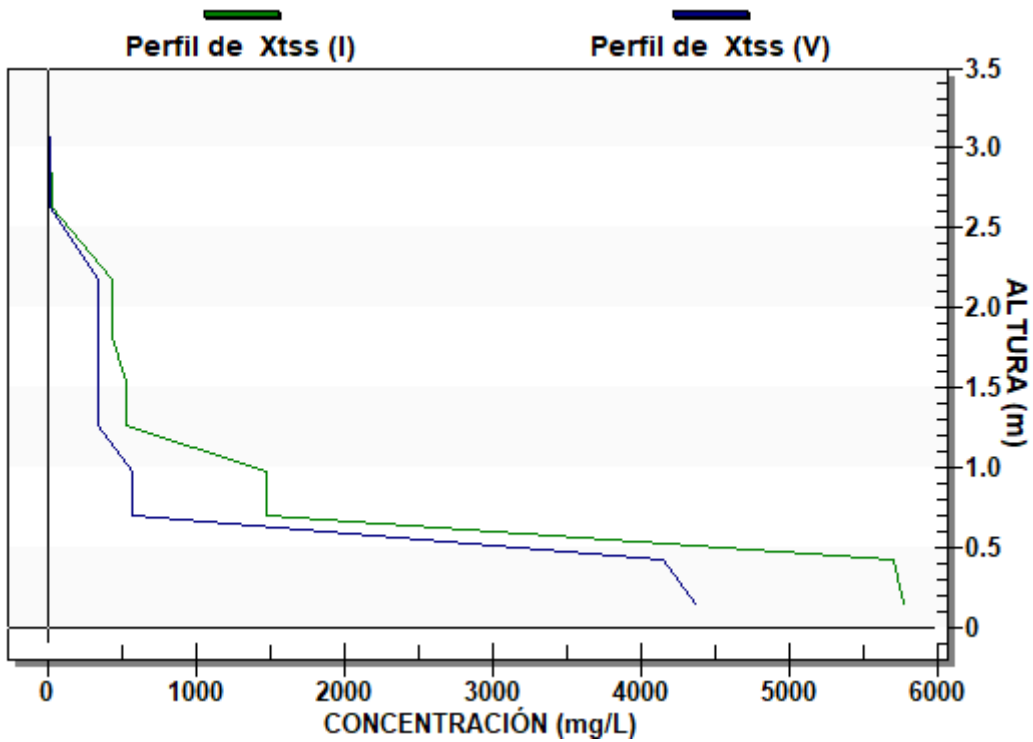


Figura 25. Perfil de SS de los decantadores secundarios de la Alternativa 2.

Respecto a las necesidades de aireación y el sistema de soplantes, se encuentran detallados en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Características de funcionamiento del sistema de soplantes requerido para la alternativa 2.

Sistema de aireación	
Necesidades O <sub>2</sub> reales en cond. punta reactor (Kg/h)	76,5
Necesidades O <sub>2</sub> reales en cond. punta digestor (Kg/h)	47,6
Nº difusores reactor	448
Nº difusores digestor	528
Nº soplantes	3 (+ 1 reserva)
Marca-Modelo	LIGP - 25.20
Pmotor - Pads (kW)	37 - 31
Potencia instalada (kW)	111
Pot. Máx. utilizada (kW)	98,36
ΔP (mbar)	600
Consumo energético aproximado (kWh/día)	2.360,78

#### 6.4. Resultados simulación alternativa 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo

Al igual que en las otras dos alternativas, los parámetros de diseño de todas las unidades de tratamiento se han obtenido para las condiciones más desfavorables, es decir, las de invierno por la baja temperatura, y posteriormente se comprobaron para las condiciones de verano. En la Tabla 29 se detallan los criterios de diseño elegidos para la alternativa 3:

**Tabla 29.** Criterios de diseño, calidad del efluente y calidad del fango deshidratado de la alternativa 3: Oxidación total con precipitación química de fósforo.

Parámetro	Invierno	Verano
Reactor de Fango Activados		
Nº Reactores	6	
V <sub>reactor</sub> (m <sup>3</sup> )	7.200	
TRC (d)	16	10
% V <sub>anóxico</sub>	20,0	
% V <sub>aerobio</sub>	80,0	
X <sub>SST</sub> (mg/l)	3.525,00	2.500,00
X <sub>H</sub> (mg/l)	1057,30	648,81
X <sub>AUT</sub> (mg/l)	48,99	25,01
R.I. (Q <sub>ext</sub> /Q <sub>entr</sub> )	4,00	
Q <sub>Ri</sub> (m <sup>3</sup> /d)	16.251,31	16.788,64
Decantación Secundaria		
Nº Decantadores	2	
Diámetro	14,92	
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,50	0,50
Q <sub>sal.fango</sub> (m <sup>3</sup> /d)	218,36	352,69
X <sub>SST,sal fango</sub> (mg/l)	7.018,49	4.365,31
Q <sub>recirculación</sub> (m <sup>3</sup> /d)	3.626,11	3.491,78
Precipitación química		
Caudal FeCl <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /d)	0,54	0,54

Concentración (mg FeCl <sub>3</sub> /l)	500.000	
Calidad del Efluente		
DQO <sub>T</sub> (mg DQO/l)	65,71	62,22
DBO <sub>5</sub> (mg DBO/l)	0,31	0,21
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	0,20	0,14
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/l)	7,26	7,12
N <sub>T</sub> (mg N/l)	8,07	7,74
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg P/l)	1,49	1,53
P <sub>T</sub> (mg P/l)	1,91	1,85
X <sub>SST</sub> (mg/l)	14,51	11,04
pH	6,36	6,41
Espesador de fangos		
Diámetro (m)	9,48	
Q <sub>ext.fango</sub> /Q <sub>ent</sub>	0,50	0,50
Concentr. Fango (Kg SS/m <sup>3</sup> )	14,00	14,00
Deshidratación mecánica		
X <sub>SST</sub> (mg/l)	250.000,00	
Q <sub>fangos</sub> (m <sup>3</sup> /d)	6,07	6,07
% SSV	63,7	63,4
% SSVB	34,6	33,3

Respecto al funcionamiento de la decantación secundaria, en la Figura 26 se puede observar el perfil de sólidos suspendidos (SS) en los decantadores. Como se puede apreciar, la altura del manto de fangos se encuentra por debajo de los 2 m tanto en invierno como en verano, por lo que los decantadores no se encuentran desbordados.

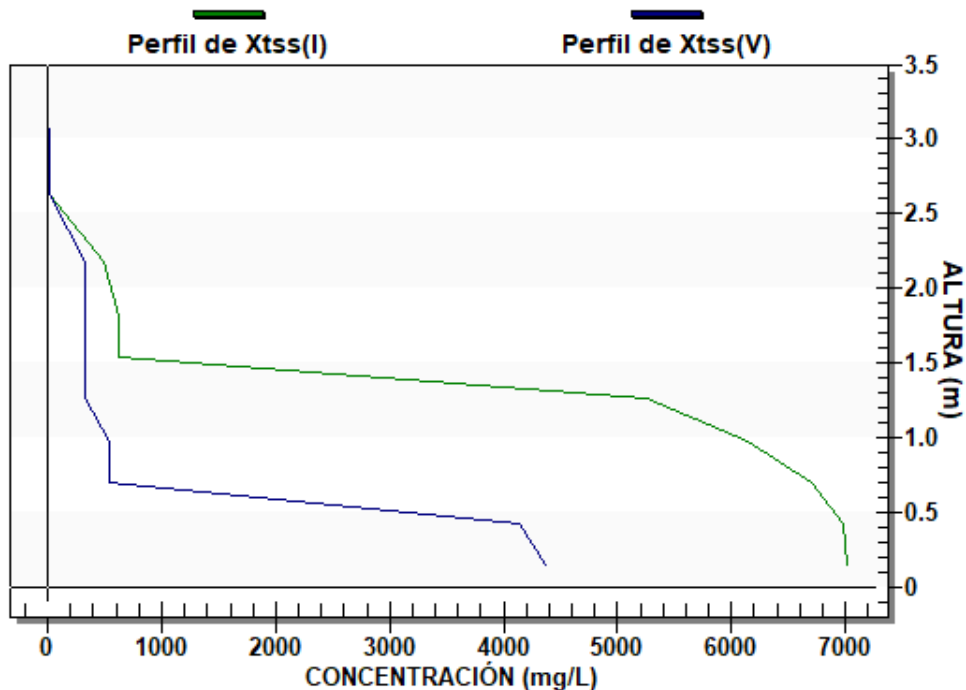


Figura 26. Perfil de SS de los decantadores secundarios de la Alternativa 3.

Respecto a las necesidades de aireación y el sistema de soplantes, se encuentran detallados en la Tabla 30:

**Tabla 30.** Características de funcionamiento del sistema de soplantes requerido para la alternativa 3.

Sistema de aireación	
Necesidades O <sub>2</sub> reales en cond. punta (Kg/h)	130,9
Nº total difusores	1440
Nº soplantes	3 (+ 1 reserva)
Marca-Modelo	LIGP - 25.20
Pmotor - Pads (kW)	37 - 31
Potencia instalada (kW)	111
Pot. Máx. utilizada (kW)	101,98
ΔP (mbar)	600
Consumo energético aproximado (kWh/día)	2.447,41

### 6.5. Diseño del tratamiento de desinfección

Finalmente, se procede a diseñar el tratamiento de desinfección, común a las tres alternativas. Debido al límite de vertido de SS ≤ 15 mg/l, y considerando que el agua tratada sólo va a ser devuelta al medio natural y no se le va a dar ningún uso específico, como método de desinfección se ha decidido utilizar radiación ultravioleta (UV). Considerando que el caudal punta del influente es de 4.620 m<sup>3</sup>/d (53,472 l/s), se ha buscado en el catálogo de módulos ultravioleta de la empresa Trojan Engineering el modelo apto para tratar dicho caudal (Figura 27).

Módulos UV existentes				
Modelo	No. de Lámparas	Longitud del Arco por Lámpara	Para Usarse en el Tratamiento de Hasta	
			(en MGD)	(en Litros/segundo)
UVM 2-36	2	30	0.12	5.0
UVM 2-64	2	58	0.40	17.5
UVM 4-36	4	30	0.80	35.0
UVM 4-64	4	58	1.50	65.0
UVM 6-64	6	58	3.00	130.0
UVM 8-64	8	58	50.00	2,200.0
UVM 16-64	16	58	500.00	22,000.0

\* La longitud de arco es la longitud (en pulgadas) de la porción de la lámpara que emite luz.

**Figura 27.** Modelos de módulos UV.(FUENTE: Trojan Engineering)

Por tanto, se ha escogido el Modelo UVM 4-64, con 4 lámparas por módulo, 64" de longitud total de tubo y 58" de longitud del arco del tubo. Como la concentración de sólidos suspendidos esperada es de unos 15 mg/l, se requiere una dosis de UV de 26.500 μWs/cm<sup>2</sup> según las especificaciones del fabricante (Figura 28).

Quantity of Suspended Solids (mg/L)	Required Trojan Design UV Dose* ( $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ )
30	30,000
25	29,000
20	28,000
15	26,500
10	25,000

\* Based on Suspended Growth Biological Treatment Processes and a 30 day geometric mean of fecal coliforms. For TSS greater than 30 mg/l contact Trojan Engineering to discuss options.

**Figura 28.** Dosis UV de diseño requerida según la concentración de sólidos suspendidos.(FUENTE: Trojan Engineering)

A su vez, se supone una transmisión de UV del 55%, y por tanto una intensidad promedio al año de  $3.000 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ , según indica el fabricante de los módulos de desinfección (29).

UV Transmission (%)	Nominal Average Intensity @ 100 hrs ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Design Average Intensity @ 1 year ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
30	2300	1500
35	2650	1750
40	3000	2000
45	3450	2300
50	3950	2600
55	4550	3000
60	5300	3450
65	6150	4000
70	7250	4700
75	8650	5630
80	10600	6885
85	13350	8685
90	17650	11465

**Figura 29.** Intensidad promedio según el porcentaje de transmisión de UV.(FUENTE: Trojan Engineering).

Una vez conocida la dosis y la intensidad, se obtiene el tiempo de retención necesario ( $\theta$ ), que para este caso resulta de 8,833 s. Por tanto, para tratar el caudal punta con ese tiempo de retención se necesita un volumen de reactor de 0,4723 m.

Conociendo el volumen de reactor necesario, se puede obtener el número de lámparas necesarias dividiendo dicho volumen por el volumen neto de acción de cada lámpara ( $0,00795 \text{ m}^3$ , según indica el fabricante), obteniendo un valor de 49,42 lámparas. Dado que éstas van agrupadas en módulos de 4 según el modelo escogido, se obtiene un número de módulos necesarios de 14,85. Aproximando a la alta se opta por tanto en instalar 16 módulos.

Se decide instalar los 16 módulos distribuyéndolos en dos grupos de 8 colocados en serie, de manera que esté un primer grupo de 8 módulos paralelos entre sí seguido del otro grupo de 8 módulos. Suponiendo una separación entre grupos de módulos de 0,5 m, y conociendo las dimensiones de los módulos, se obtiene un tanque de desinfección de 0,61 m de ancho y 3,76 m de largo.

## 6.6. Comparación de las alternativas.

En este apartado se va a realizar una comparativa de los resultados obtenidos para cada una de las alternativas valoradas en cuanto a calidad del efluente. Estos resultados se encuentran recogidos en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Comparación calidad del efluente en las diferentes alternativas.

Parámetro	Influyente	Efluente Alternativa 1		Efluente Alternativa 2		Efluente Alternativa 3		Límite de vertido
		Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	
DQO <sub>T</sub> (mg DQO/l)	946,50	69,11	66,71	61,18	59,37	65,71	62,22	125,00
DBO <sub>5</sub> (mg DBO/l)	484,60	0,49	0,34	0,32	0,29	0,31	0,21	25,00
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	57,90	0,80	0,23	0,53	0,22	0,20	0,14	4,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/l)	0,80	7,97	8,09	8,06	8,12	7,26	7,12	-
N <sub>T</sub> (mg N/l)	76,30	9,42	8,85	9,25	8,88	8,07	7,74	15,00
P <sub>T</sub> (mg P/l)	13,52	1,91	0,69	1,89	1,85	1,91	1,85	2,00
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg P/l)	11,80	1,43	0,25	0,93	0,99	1,49	1,53	-
X <sub>SST</sub> (mg/l)	429,41	14,45	11,92	13,18	11,36	14,51	11,04	15,00

A continuación, en la Tabla 32, se muestran los porcentajes de reducción de los diferentes parámetros en cada alternativa.

**Tabla 32.** Porcentaje de eliminación de cada parámetro en las diferentes alternativas.

Parámetro	% Eliminación Alternativa 1		% Eliminación Alternativa 2		% Eliminación Alternativa 3	
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
DQO <sub>T</sub> (mg DQO/l)	92,7	92,9	93,5	93,7	93,1	93,4
DBO <sub>5</sub> (mg DBO/l)	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/l)	98,6	99,6	99,1	99,6	99,7	99,8
N <sub>T</sub> (mg N/l)	87,6	88,4	87,9	88,4	89,4	89,9
P <sub>T</sub> (mg P/l)	85,9	94,9	86,0	86,3	85,9	86,3
X <sub>SST</sub> (mg/l)	96,6	97,2	96,9	97,3	96,6	97,4

Como se puede observar en las tablas anteriores, las tres alternativas planteadas cumplen con todos los requisitos de vertido. Dado que a priori no se piensa dar uso al fango deshidratado y el agua tratada sólo va a ser devuelta al medio natural, desde un aspecto técnico todas las alternativas son válidas. Por tanto, se realizará un análisis económico de cada una, considerando costes asociados a inversión de las infraestructuras requeridas por cada planta y los costes de explotación. Este análisis será el factor decisivo para la elección de la alternativa idónea.

## 7. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS

Para seleccionar la alternativa más adecuada, se va a realizar un estudio económico de cada una de las alternativas propuestas. Los costes se dividirán en costes de construcción, que son aquellos relacionados con la inversión en infraestructuras y equipos, y costes de explotación u operación como puede ser el consumo energético, los productos químicos, el mantenimiento y costes de personal.

Antes de comenzar con el análisis económico cabe mencionar que todos aquellos costes que, ya sean de explotación o de construcción, estén asociados a los elementos de tratamiento comunes a todas las alternativas (pretratamiento y desinfección), así como los asociados a personal, mantenimiento y otros costes varios, no van a ser considerados en el análisis económico debido a que, como se ha mencionado, son independientes de qué alternativa sea escogida finalmente. Sólo se van a considerar aquellos costes relacionados a las diferencias entre las alternativas.

### 7.1. Costes de construcción

En este apartado se considerarán los gastos aproximados de inversión de las infraestructuras necesarias para poder implantar cada una de las alternativas propuestas. Por tanto, se va a considerar la obra civil a ejecutar para las unidades de tratamiento principales, así como la adquisición de equipos como soplantes, difusores y agitadores. Cabe destacar que los costes son aproximados debido a la dificultad de cálculo de todos los costes de inversión (principalmente aquellos relacionados a la obra civil) asociados a cada alternativa, aunque el principal objetivo es la comparación entre las diferentes alternativas a pesar de que diste bastante de la realidad.

Como se ha mencionado previamente, no se han considerado aquellos costes de inversión asociados a los sistemas de pretratamiento, desodorización y desinfección para el cálculo de los costes dado que al tratarse de elementos comunes no afectan a la comparación global. Del mismo modo, tampoco se han considerado los costes de inversión de la deshidratación del fango ni de las bombas de impulsión de cabecera ni de recirculación interna y de fango.

#### 7.1.1. Coste de obra civil

En la Tabla 33 se detallan aproximadamente los costes de inversión en infraestructuras de las diferentes alternativas, de acuerdo con los parámetros de diseño simulados y detallados en el apartado 6:

**Tabla 33.** Costes de inversión infraestructuras para cada alternativa.(FUENTE: Casas Boada, 2020)

Alternativa	Unidad Tratamiento	Cantidad	Importe (€)	Importe total (€)
1	Reactor biológico 7.700 m <sup>3</sup>	1	1.509.200,00	<b>2.164.520,00</b>
	Decantador 2º 14,80 m de diámetro	2	509.120,00	
	Espesador de 8,50 m de diámetro	1	146.200,00	
2	Decantador 1º 13,76 m de diámetro	1	236.672,00	<b>1.686.704,76</b>
	Reactor biológico 2.000 m <sup>3</sup>	1	392.000,00	
	Decantador 2º 14,50 m de diámetro	2	498.800,00	
	Digestor aerobio 2.107,31 m <sup>3</sup>	1	413.032,76	
3	Espesador de 8,50 m de diámetro	1	146.200,00	<b>2.087.504,00</b>
	Reactor biológico 7.200 m <sup>3</sup>	1	1.411.200,00	
	Decantador 2º 14,92 m de diámetro	2	513.248,00	
	Espesador de 9,48 m de diámetro	1	163.056,00	

### 7.1.2. Coste de adquisición de equipos

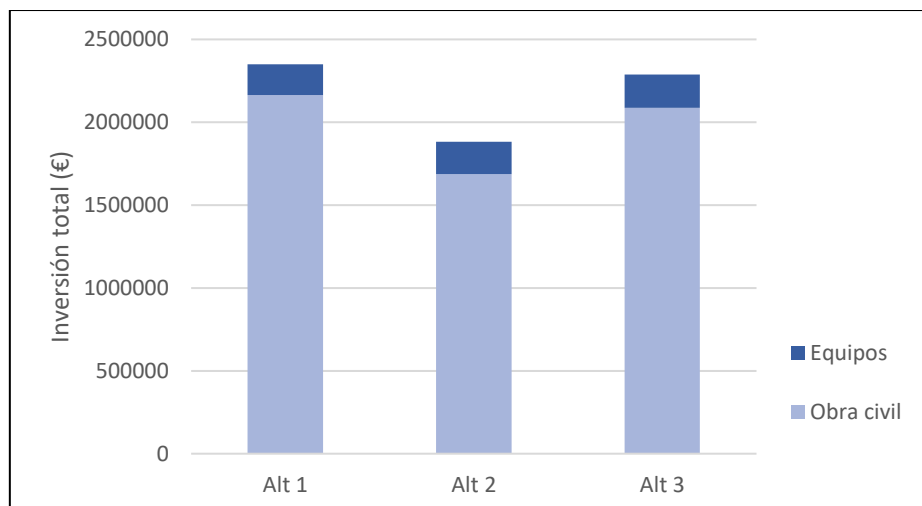
Respecto a los costes relacionados con los equipos necesarios para cada alternativa, se considerarán aquellos que dependen del diseño de cada alternativa, como pueden ser difusores, soplantes, agitadores y bombeos adicionales. No se han considerado para el coste de inversión equipos pertenecientes a los tratamientos comunes como los módulos UV de la desinfección o las bombas de cabecera de planta. A su vez, se ha asumido que equipos como las bombas de recirculación interna, recirculación de fangos y purga de secundarios son las mismas para todas las alternativas, por lo que al no afectar a la comparativa global tampoco se van a considerar. Del mismo modo, tampoco se han considerado equipos adicionales varios como válvulas, equipos de control y medición, etc. En la Tabla 34 se detallan aproximadamente los costes de los equipos necesarios para cada alternativa:

**Tabla 34.** Costes de adquisición de equipos para cada alternativa.

Alternativa	Equipo	Cantidad	Importe (€)	Importe total (€)
1	Agitador mecánico sumergido	4	7.400,00	<b>184.360,00</b>
	Difusor FLYGT membrana 23cm	832	24.960,00	
	Centrífuga ANDRITZ D2 (1 + 1 reserva)	2	112.000,00	
	Soplante LIGP modelo 25.20 (3+1 reserva)	4	40.000,00	
2	Bomba purga decantador primario	2	12.000,00	<b>196.130,00</b>
	Agitador mecánico sumergido	1	1.850,00	
	Difusor FLYGT membrana 23cm	976	29.280,00	
	Centrífuga ANDRITZ D2 (1 + 1 reserva)	2	112.000,00	
	Bomba dosificación cloruro férrico	1	1.000,00	
Soplante LIGP modelo 25.20 (3+1 reserva)	4	40.000,00		
3	Agitador mecánico sumergido	2	3.700,00	<b>199.900,00</b>
	Difusor FLYGT membrana 23cm	1440	43.200,00	
	Centrífuga ANDRITZ D2 (1 + 1 reserva)	2	112.000,00	
	Soplante LIGP modelo 25.20 (3+1 reserva)	4	40.000,00	
	Bomba dosificación cloruro férrico	1	1.000,00	

### 7.1.3. Costes totales de construcción

En la Figura 30 se muestra la comparación de la inversión en infraestructuras (CAPEX) para cada alternativa.



**Figura 30.** Comparación de la inversión en infraestructuras por obra civil y equipos para cada alternativa.



Como se puede apreciar, la obra civil supone el mayor porcentaje del coste de inversión en infraestructura en todas las alternativas (aproximadamente el 90%), como era de esperar.

Una vez obtenidos los costes de inversión aproximados de las infraestructuras y equipos necesarios para cada alternativa, se debe calcular la cuota anual periódica para poder amortizar dicha inversión. Dicho cálculo se va a realizar utilizando el sistema francés, manteniendo las cuotas constantes:

$$C = C_0 \cdot \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \quad \text{Ec. 17}$$

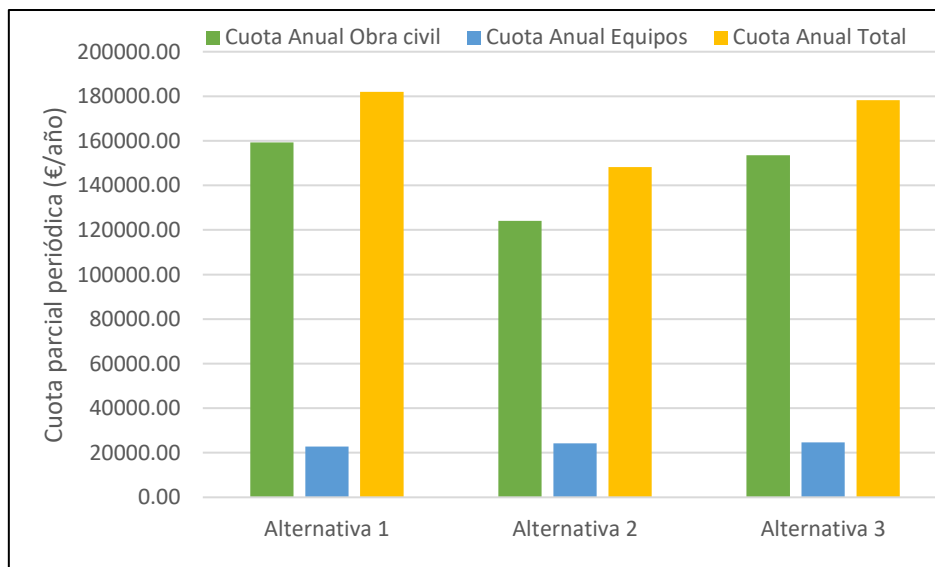
donde:

- C es la cuota periódica constante
- C<sub>0</sub> es el capital prestado
- n es el número de períodos que dura la amortización, en años
- i es el tipo de interés anual del préstamo

En este caso, se ha considerado un tiempo de amortización de 10 años para los equipos adquiridos y 20 años para los elementos de obra civil. A su vez, se ha asumido un interés del 4%. De este modo, se obtiene la cuota anual periódica, tanto la total como la de cada concepto, para cada alternativa (Tabla 35).

**Tabla 35.** Cuota anual obra civil y equipos y cuota anual total para cada alternativa.

Alt.	Coste Obra civil (€)	Coste Equipos (€)	Coste Total Construcción (€)	Cuota Anual Obra civil (€/año)	Cuota Anual Equipos (€/año)	Cuota Anual Total (€/año)
1	2.164.520,00	184.360,00	2.348.880,00	159.269,17	22.729,92	181.999,09
2	1.686.704,76	196.130,00	1.882.834,76	124.110,69	24.181,05	148.291,74
3	2.087.504,00	199.900,00	2.287.404,00	153.602,20	24.645,86	178.248,06



**Figura 31.** Cuota obra civil y equipos y cuota anual total para las alternativas propuestas.

Se observa que, de las tres alternativas, la de tratamiento convencional con digestión aerobia de fangos, es decir, la alternativa 2, tiene una cuota anual significativamente más baja (**148.291,74 €/año**), mientras que las de las alternativas 1 y 3, ambas de oxidación total, son significativamente similares.

## 7.2. Costes de explotación

En este apartado se consideran los costes asociados a la explotación de la planta que difieren de una alternativa a otra, como pueden ser el consumo energético de las soplantes y de la agitación mecánica, los reactivos necesarios para la deshidratación del fango y la precipitación de fósforo. Los costes de explotación asociados a elementos comunes tales como el consumo energético del pretratamiento, bombas de impulsión de cabecera o del sistema de desinfección por radiación UV no se han considerado al no afectar a la comparación global entre alternativas. Del mismo modo, dado que los caudales de fangos son asimilables, asumo que no hay variación en el consumo de las centrífugas de una alternativa a otra.

### 7.2.1. Coste de gestión de fangos

Durante el proceso de tratamiento de aguas residuales se generan unos elementos rechazados del agua que se deben evacuar de la planta como basuras, grasas y flotantes, arenas y los fangos deshidratados. Los costes asociados al tratamiento de los lodos varían considerablemente según el tipo de tratamiento: secado térmico convencional, compostaje, eliminación a vertedero, etc. Sin considerar el transporte, el coste de gestión de los lodos oscila entre los 5 €/tn m.h. y los 60 €/tn m.h. según el tratamiento. Considerando que el precio del transporte en camiones de 25 tn se encuentra alrededor de 13 €/tn, se supone un coste aproximado de gestión del lodo de **30 €/tn**. En la Tabla 36 se detalla la producción de fango y su coste asociado a su gestión para cada alternativa:

Tabla 36. Coste asociado a la gestión de fango deshidratado producido.

Parámetro	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
Caudal fango deshidratado (m <sup>3</sup> /d)	5,58	5,56	6,20	5,96	6,07	6,07
X <sub>SST</sub> fango (mg/l)	250.000		250.000		250.000	
Fango seco producido (Kg/d)	1.395,00	1.390,00	1.550,00	1.490,00	1.517,50	1.517,50
Producción media fango seco (Kg/d)	1.392,50		1.520,00		1.517,50	
Producción anual fango seco (tn/año)	508,26		554,80		553,89	
Coste anual (€/año)	15.247,80		16.644,00		16.616,70	

### 7.2.2. Coste de reactivos químicos

Entre los reactivos destaca el uso de cloruro férrico para la precipitación química de fósforo, empleada en las alternativas 2 y 3. Tomando los datos de la Tabla 27 y Tabla 29, y asumiendo un coste de **200€/tn** de reactivo, se han calculado los costes asociados en la Tabla 37:

Tabla 37. Coste asociado al consumo de cloruro férrico para precipitación química de fósforo.

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Caudal FeCl <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /d)	0,00	0,70	0,54
Concentración (mg FeCl <sub>3</sub> /l)	0,00	500.000,00	500.000,00
Dosis (Kg FeCl <sub>3</sub> /d)	0,00	350,00	270,00
Consumo anual (tn FeCl <sub>3</sub> /año)	0,00	127,75	98,55
Coste anual (€/año)	0,00	25.550,00	19.710,00

Otro reactivo químico que considerar es polielectrolito catiónico, utilizado en la deshidratación de fangos. Se suelen utilizar de 8 a 12 Kg de polielectrolito por tonelada de materia seca de fango producido, por lo que se ha asumido un consumo medio de **10 Kg/tn**, con un coste aproximado de **2.800 €/tn** de polielectrolito. En la Tabla 38 se muestra el coste asociado al polielectrolito para cada alternativa:

**Tabla 38.** Coste asociado al consumo de polielectrolito para el tratamiento de fangos.

Parámetro	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
Caudal entrada deshidratación (m <sup>3</sup> /d)	102,44	142,13	75,68	87,82	109,18	176,34
X <sub>SST</sub> fango (mg/l)	13.699,45	9.872,00	20.571,98	17.036,52	13.995,39	8.700,88
Fango producido (Kg/d)	1.403,37	1.403,11	1.556,89	1.496,15	1.528,02	1.534,31
Producción media fango (Kg/d)	1.403,24		1.526,52		1.531,17	
Producción anual fango seco (tn/año)	512,18		557,18		558,88	
Consumo polielectrolito (tn/año)	5,1218		5,5718		5,5888	
Coste anual (€/año)	14.341,04		15.601,04		15.648,64	

### 7.2.3. Coste del consumo energético

El coste energético suele representar uno de los costes mayoritarios de una EDAR. En este apartado se tiene en cuenta el consumo energético de las soplantes, bombas y de agitación de reactores anaerobios y anóxicos. El coste medio para la energía eléctrica en la modalidad de 6 periodos para el libre mercado se ha estimado en **0,22 €/kWh**, según los datos consultados en ENDESA.

- **Agitación mecánica**

Los reactores anóxicos y anaerobios requieren una agitación mecánica continua, lo cual conlleva un consumo energético. Se ha considerado que la potencia adsorbida en los reactores es de **10 W/m<sup>3</sup>**. En la Tabla 39 se muestran los consumos energéticos asociados a la agitación y su coste anual para cada alternativa.

**Tabla 39.** Consumo energético medio y coste anual asociado a la agitación mecánica para cada alternativa.

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Volumen anaerobio (m <sup>3</sup> )	2.926,00	0,00	0,00
Volumen anóxico (m <sup>3</sup> )	1.386,00	400,00	1.440,00
Potencia agitación necesaria (kW)	43,12	4,00	14,40
Consumo energético medio (kWh/d)	1.034,88	96,00	345,60
Coste anual (€/año)	83.100,87	7.708,80	27.751,68

- **Soplantes**

El consumo energético aproximado de las soplantes se ha calculado mediante las simulaciones de DESASS descritas anteriormente para cada alternativa. En la Tabla 40 se muestran el consumo energético medio diario y el coste anual asociado a las soplantes necesarias para cada alternativa.

**Tabla 40.** Consumo energético medio y coste anual asociado a la aireación para cada alternativa.

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Nº soplantes	3+1	3+1	3+1
Marca - Modelo	LIGP - 25.20	LIGP - 25.20	LIGP - 25.20
Pmotor - Pads (kW)	37 - 31	37 - 31	37 - 31
Potencia instalada (kW)	111	111	111
Consumo medio energético aproximado (kWh/día)	2.187,51	2.360,78	2.447,41
Coste anual (€/año)	175.657,06	189.570,64	196.527,03

• **Bombeos**

En este apartado se va a calcular el consumo energético aproximado de sólo las bombas que difieran de una alternativa a otra, como puede ser la recirculación interna, la recirculación de fangos y los bombeos a digestor. Por tanto, no se va a considerar el bombeo de cabeza de planta ni el de efluente a tratamiento terciario. A su vez, tampoco se ha considerado el bombeo de sobrenadante a cabecera de planta.

En el caso de las alternativas 2 y 3 que emplean precipitación química, tampoco se han considerado las bombas de dosificación de cloruro férrico, dado que su consumo es mínimo y no afectaría a los cálculos.

Se calcula la potencia adsorbida de las bombas a partir de los caudales de bombeo obtenidos en las simulaciones con DESASS aplicando la siguiente ecuación (Casas Boada, 2020):

$$P_{ads} = \frac{q_{imp} \cdot \gamma \cdot H_m}{\eta_{bomba}} \quad \text{Ec.18}$$

Donde:

- $P_{ads}$  es la potencia adsorbida de la bomba, en kW
- $q_{imp}$  es el caudal volumétrico de impulsión, en  $m^3/s$
- $\gamma$  es el peso específico del agua,  $9,81 \text{ kN/m}^3$
- $\eta_{bomba}$  es la eficiencia de la bomba, que suponemos en 0,75
- $H_m$  es la altura manométrica, en m.c.a.

La altura manométrica representa la suma de la diferencia de cota entre la entrada y la salida de la tubería (altura geométrica), las pérdidas de carga totales en las conducciones y las de los accidentes presentes en ese tramo (válvulas, codos, etc.). Se asume que el peso específico de los lodos es igual al del agua, dado que la densidad de los mismos antes de la deshidratación es aproximable.

Dado que no se dispone de datos exactos de la instalación hidráulica, se desconocen los valores de las pérdidas de carga totales, por lo que se han supuesto unos valores de pérdidas de carga por tuberías y por desnivel según el tipo de bombeo (Puga Usucachi, 2016). En la Tabla 41 se detallan las pérdidas de carga asumidas, la potencia, el consumo y el coste asociado a cada bombeo:

**Tabla 41.** Consumo energético medio y coste anual asociado al bombeo para cada alternativa.

Alt.	Bombeo	Temp.	$Q_{imp}$ ( $m^3/s$ )	$H_m$ (mca)	$P_{ads}$ (kW)	Consumo energía (kWh/d)	Consumo energía medio (kWh/d)	Coste anual (€/año)
1	Recirculación interna	Invierno	0,1875	0,5	1,2260	29,425	29,713	2.385,98
		Verano	0,1911		1,2501	30,002		
	Recirculación fango 2º	Invierno	0,0421	1,5	0,8265	19,836	19,619	1.575,43
		Verano	0,0412		0,8085	19,403		
	Purga 2º a espesador	Invierno	0,0024	1,5	0,0465	1,117	1,333	107,03
		Verano	0,0033		0,0645	1,549		
	Fangos espesados	Invierno	0,0012	0,5	0,0078	0,186	0,222	17,84
		Verano	0,0016		0,0108	0,258		

2	Purga 1º a digestor	Invierno	0,0007	1,0	0,0091	0,218	0,218	17,54
		Verano	0,0007		0,0091	0,219		
	Recirculación interna	Invierno	0,1822	0,5	1,1917	28,601	28,689	2.303,71
		Verano	0,1833		1,1990	28,776		
	Recirculación fango 2º	Invierno	0,0434	1,5	0,8523	20,454	20,390	1.637,30
		Verano	0,0432		0,8469	20,325		
	Purga 2º a digestor	Invierno	0,0011	1,5	0,0208	0,498	0,563	45,24
Verano		0,0013	0,0262		0,628			
Digestor a espesador	Invierno	0,0018	1,5	0,0344	0,825	0,891	71,55	
	Verano	0,0020		0,0399	0,957			
Fangos espesados	Invierno	0,0009	0,5	0,0057	0,138	0,149	11,94	
	Verano	0,0010		0,0066	0,160			
3	Recirculación interna	Invierno	0,1881	0,5	1,2301	29,523	30,011	2.409,91
		Verano	0,1943		1,2708	30,499		
	Recirculación fango 2º	Invierno	0,0420	1,5	0,8234	19,762	19,396	1.557,52
		Verano	0,0404		0,7929	19,030		
	Purga 2º a espesador	Invierno	0,0025	1,5	0,0496	1,190	1,556	124,96
		Verano	0,0041		0,0801	1,922		
	Fangos espesados	Invierno	0,0013	0,5	0,0083	0,198	0,259	20,83
		Verano	0,0020		0,0133	0,320		

Una vez calculados los consumos energéticos aproximados de la agitación mecánica de los reactores anóxicos y anaerobios, los bombeos principales y el sistema de aireación para cada alternativa, se muestra un cuadro resumen del consumo de energía asociado a cada parte del sistema y su coste anual parcial, así como el consumo energético medio global y su coste para cada alternativa:

**Tabla 42.** Consumo energético parcial y global y coste anual parcial y global asociado para cada alternativa.

Alt.	Elemento	Consumo energía parcial (kWh/d)	Coste anual parcial (€/año)	Consumo energía global (kWh/d)	Coste anual global (€/año)
1	Agitación	1.034,88	83.100,87	3.273,28	262.844,39
	Soplantes	2.187,51	175.657,06		
	Bombas	50,89	4.086,31		
2	Agitación	96,00	7.708,80	2.507,68	201.366,71
	Soplantes	2.360,78	189.570,64		
	Bombas	50,90	4.087,27		
3	Agitación	345,60	27.751,68	2.844,23	228.391,67
	Soplantes	2.447,41	196.527,03		
	Bombas	51,22	4.113,21		

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la alternativa con menor coste energético es la alternativa 2, mientras que la de mayor coste es la alternativa 1. Esto se debe a la diferencia de volumen, dado que la alternativa 1 necesita un reactor biológico considerablemente más voluminoso que la 2, el cual aunque no se encuentre totalmente aireado, es necesario mantener

agitado. En la Figura 32 se ilustran los consumos de energía parciales y globales para cada alternativa.

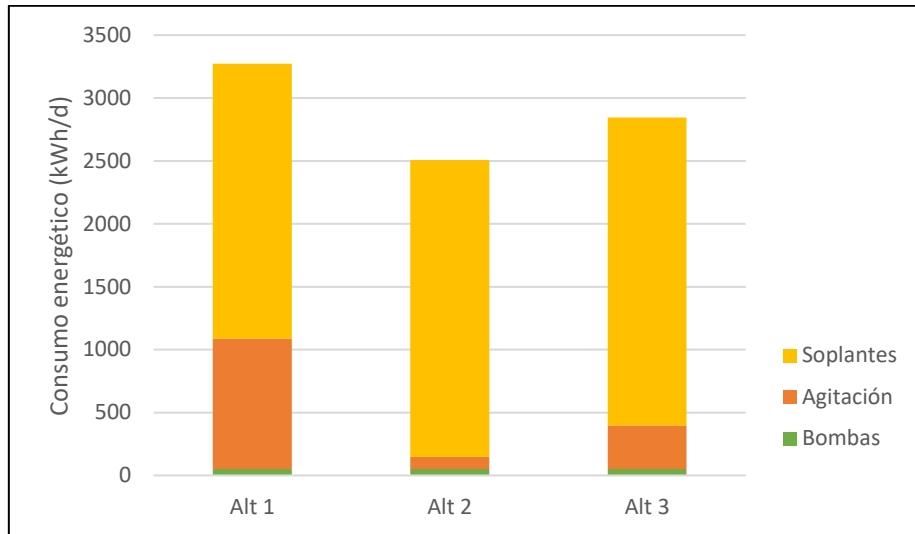


Figura 32. Consumos energéticos parciales y globales para cada alternativa.

Como se puede observar en el gráfico anterior, el mayor consumo energético se produce en las soplantes, como era esperable, que supone más de dos tercios del coste de energía en todas las alternativas. En una de las alternativas llega a suponer más del 90% del consumo energético diario de la planta. Por otro lado, se puede apreciar que los costes de bombeo son considerablemente pequeños. Además, a pesar de existir más bombeos en la alternativa 2 por la instalación de un decantador primario y de un digestor, no suponen una gran diferencia de consumo con respecto a las otras alternativas.

#### 7.2.4. Costes totales de explotación

Una vez se han descrito los costes de explotación para cada una de las alternativas, excluyendo aquellos que son comunes a las mismas, en la Tabla 43 se detalla el coste anual parcial para cada tipo de coste de explotación y el coste global anual de explotación para cada una de las alternativas.

Tabla 43. Coste anual parcial de explotación y coste anual total de explotación (COPEX) para cada alternativa.

Alternativa	Costes parciales de explotación (€/año)			Coste anual Explotación (€/año)	Coste (€/m <sup>3</sup> )
	Gestión de fangos	Reactivos Químicos	Consumo energético		
<b>1</b>	15.247,80	14.341,04	262.844,39	292.433,23	<b>0,208</b>
<b>2</b>	16.644,00	41.151,04	201.366,71	259.161,75	<b>0,184</b>
<b>3</b>	16.616,70	35.358,64	228.391,67	280.367,01	<b>0,199</b>

En la Figura T se muestra la comparación del coste total anual de explotación para cada alternativa. Como se puede apreciar, el menor coste total de explotación le corresponde a la alternativa 2, el reactor de fangos activos tradicional con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química, con un coste de **0,184 €/m<sup>3</sup>**. Por el contrario, la más costosa es la alternativa 1, la oxidación total con eliminación biológica de fósforo, debido al elevado coste asociado al consumo energético.

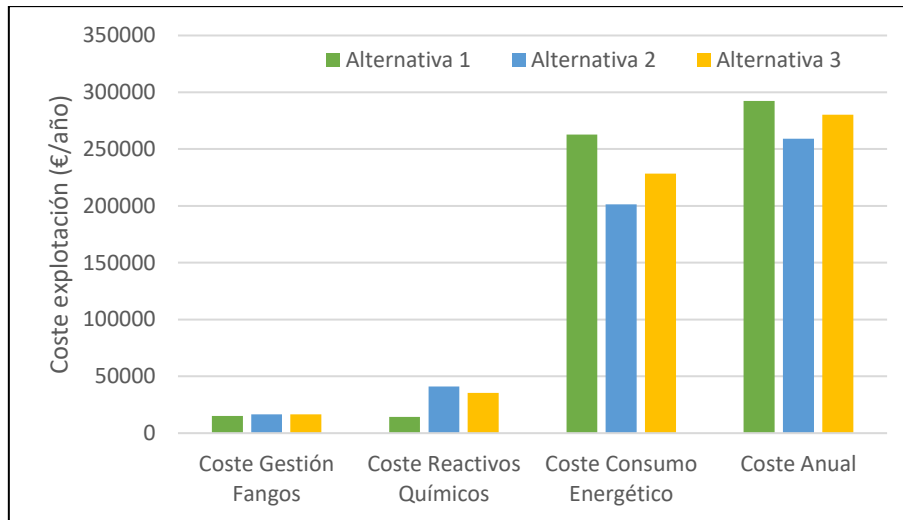


Figura 33. Comparación costes anuales parciales y totales de explotación para cada alternativa.

### 7.3. Coste total anual

Para el cálculo total anual se consideran los costes anuales de capital (CAPEX) y los costes anuales de explotación (OPEX), calculados anteriormente y detallados en la Tabla 35 y Tabla 43. De este modo, sumando ambos costes se obtiene el coste total anual para cada alternativa, lo que permite seleccionar aquella idónea desde un punto de vista económico. Estos costes se detallan en la Tabla 44.

Tabla 44. CAPEX, OPEX y coste total anual para cada alternativa.

Alternativa	CAPEX (€/año)	OPEX (€/año)	Coste total (€/año)	Coste promedio tratamiento (€/m <sup>3</sup> )
1	181.999,09	292.433,23	<b>474.432,32</b>	<b>0,34</b>
2	148.291,74	259.161,75	<b>407.453,49</b>	<b>0,29</b>
3	178.248,06	280.367,01	<b>458.615,07</b>	<b>0,33</b>

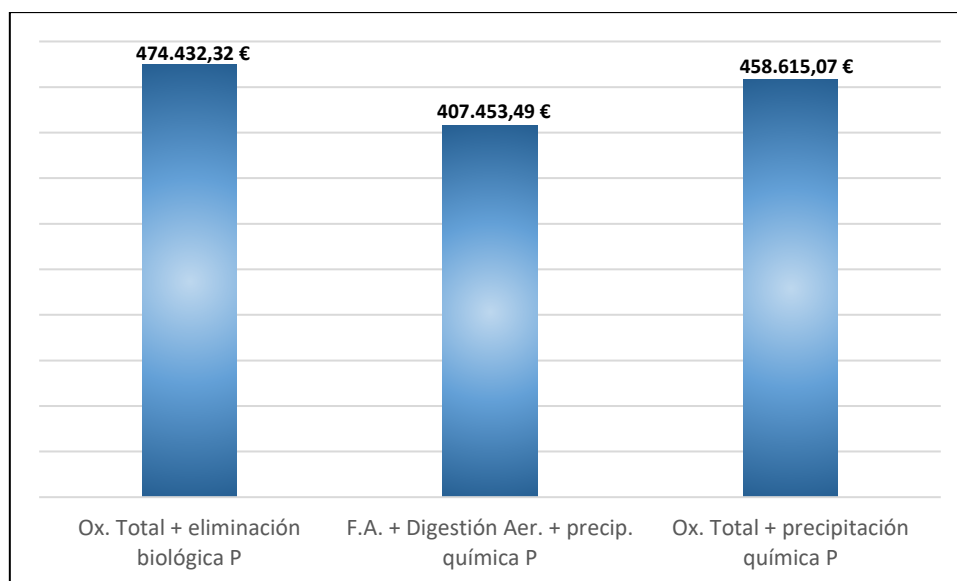


Figura 34. Coste total anual de las alternativas propuestas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, desde un punto de vista económico el tratamiento convencional de fangos activos con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo (alternativa 2) es la opción idónea, con un coste total anual de **407.453,49 €/año** y un coste promedio de **0,29 €/m<sup>3</sup>** de agua residual tratada.

Por el contrario, la alternativa más costosa es la oxidación total con eliminación biológica de fósforo (alternativa 1). Esto se debe a que, pese a no precisar de reactivos para eliminar los nutrientes y simplificar considerablemente el esquema de tratamiento del fango, necesita un volumen de reactor biológico casi cuatro veces superior al de la alternativa 2, lo que supone no sólo un aumento considerable de coste de inversión en infraestructuras, sino también un consumo energético significativamente mayor por la necesidad de agitación de las zonas anaerobias y anóxicas del reactor.

#### **7.4. Selección de la alternativa idónea**

A la vista de los resultados del análisis de los costes de explotación y de capital para cada una de las alternativas propuestas (Figura 34) y de los resultados de calidad del efluente obtenidos en las simulaciones (Tabla 31), se concluye que, desde un punto de vista técnico y económico, el tratamiento convencional de fangos activados con digestión aerobia de fangos y precipitación química de fósforo (alternativa 2) es la alternativa óptima por los motivos siguientes:

- Desde el punto de vista técnico, el efluente cumple con todos los requisitos de vertido establecidos para el agua residual del municipio de Sa Pobra (Tabla 21), y el fango producido está estabilizado, lo cual es suficiente dado que a priori no se le va a dar ningún uso y se va a enviar a vertedero.
- Desde el punto de vista económico, la alternativa 2 ha resultado ser la más económica de las tres que se han propuesto, con un coste total anual de **407.453,49 €/año** y un coste de **0,29 €/m<sup>3</sup>** de agua tratada.



## 8. PROPUESTA IMPLANTACIÓN ALTERNATIVA ÓPTIMA

Una vez se ha seleccionado la alternativa idónea de entre las tres propuestas, se procede a realizar una propuesta de implantación. Para ello, se van a considerar tanto la superficie disponible como la posibilidad de adaptar parte de la infraestructura de la antigua EDAR, lo cual permitiría reducir significativamente los costes. En la Figura X se muestra la superficie disponible para la construcción de la nueva EDAR.

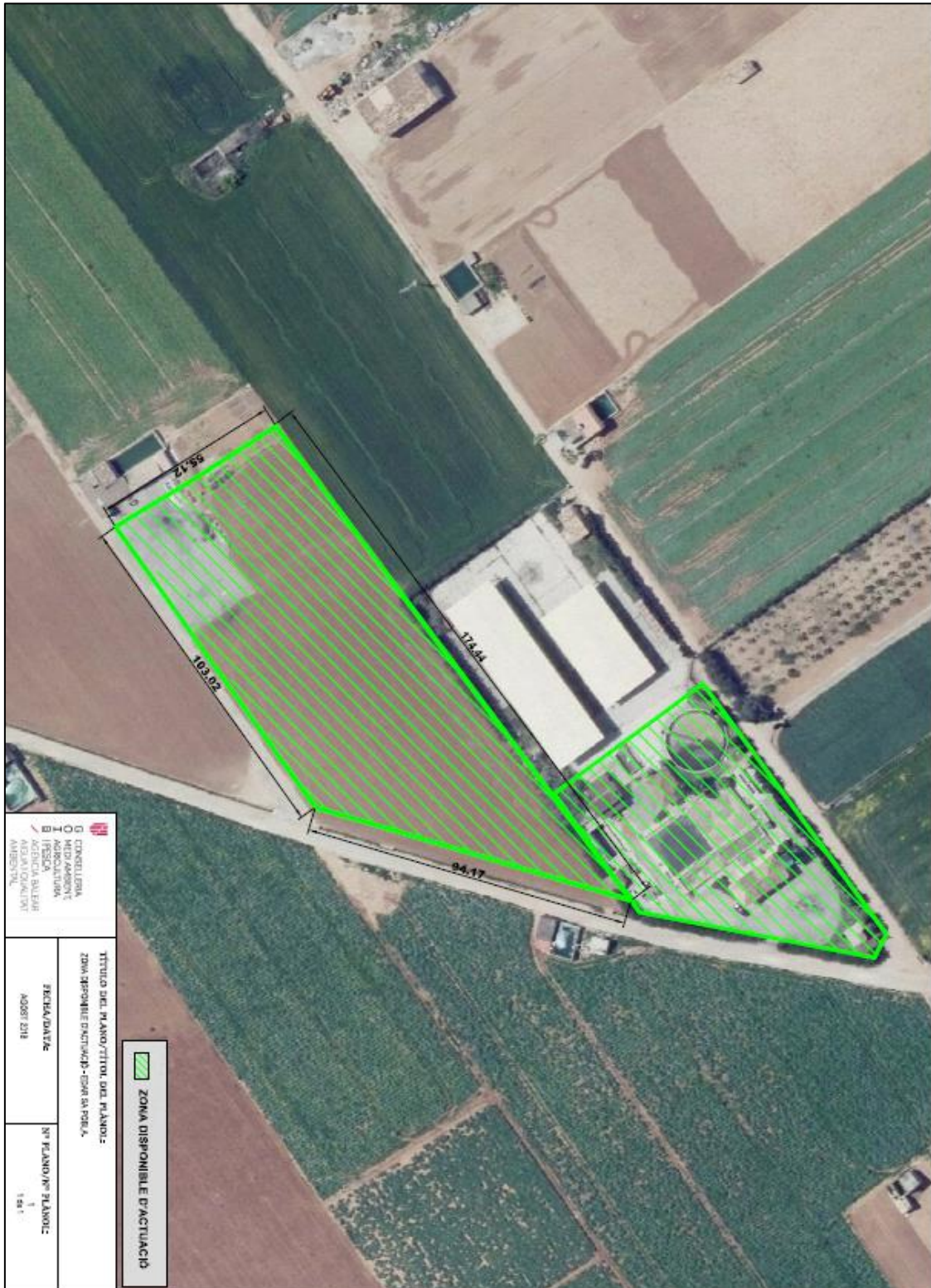


Figura 35. Plano de la superficie disponible para la construcción de la nueva EDAR Sa Pobra (FUENTE: Documentación técnica adicional, GOIB).

En total, la superficie disponible asciende a aproximadamente 12.200 m<sup>2</sup>, de los cuales 8.800 m<sup>2</sup> pertenecen a la parcela colindante expropiada. De acuerdo con el diseño de la alternativa 2 (Tabla 25), se precisa de:

- Un decantador primario, de 13,76 m de diámetro.
- Un reactor biológico de 2.000,00 m<sup>3</sup>.
- Dos decantadores secundarios, de 14,50 m de diámetro cada uno.
- Un digestor aerobio de 2.017,31 m<sup>3</sup>.
- Un espesador por gravedad de 8,50 m de diámetro.

En la EDAR actual, el recinto biológico consta de dos compartimentos de base cuadrada de 976 m<sup>3</sup> (uno actuando como digestor aerobio y otro como parte aerobia del reactor biológico) y otro compartimento rectangular de 464 m<sup>3</sup> como reactor anóxico. Por tanto, el módulo biológico actual tiene un volumen total de 2.416 m<sup>3</sup>. Se propone la eliminación de las separaciones entre compartimentos y reducir el calado (previamente de 5,20 m) para aprovechar el antiguo módulo biológico como nuevo digestor aerobio.

Por otro lado, tanto el nuevo reactor biológico como los decantadores se construirían en la parcela anexionada. El espesador antiguo tiene la mitad de diámetro que el necesario en la ampliación, por lo que se reacondicionaría el viejo decantador secundario, de 16,00 m, y se reduciría su tamaño para su aprovechamiento como nuevo espesador de fangos.

Respecto al pretratamiento, se movería a la nueva zona habilitada, junto a la decantación primaria, mientras que la deshidratación de fangos se mantendría en el mismo edificio, cerca del digestor. En la Figura T se muestra un esquema básico aproximado del diseño de la nueva EDAR.



Figura 36. Esquema básico aproximado del diseño de la nueva EDAR Sa Pobra.

El aprovechamiento del antiguo módulo biológico y del edificio de deshidratación permitiría reducir significativamente los costes de capital (CAPEX), concretamente aquellos asociados a la obra civil.

## 9. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la situación actual de la EDAR Sa Pobra y se han propuesto tres alternativas de diseño diferentes para su ampliación y mejora. Dichas alternativas han sido simuladas mediante el software DESASS y posteriormente se ha estudiado su viabilidad técnica y económica. Una vez terminado el estudio se han extraído las siguientes conclusiones.

- Actualmente el tratamiento de la EDAR no cumple con los requisitos de vertido establecidos por la legislación vigente, dado que recibe un caudal de influente notablemente mayor al de su diseño, lo que ha provocado problemas de vertidos en el cercano Parque Natural de s'Albufera de Mallorca.
- Los valores de los parámetros que caracterizan el agua de entrada recogidos entre 2017 y 2019, recogidos por la empresa explotadora, no parecen seguir una tendencia estacional.
- Desde un punto de vista técnico, los resultados obtenidos en la simulación de todas las alternativas propuestas mediante el software DESASS cumplen con los límites de vertido fijados y logran que el fango deshidratado esté estabilizado, por lo que todas son viables.
- Desde un punto de vista económico, el menor coste de explotación le corresponde al tratamiento convencional de fangos activos con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química (alternativa 2), con un coste de **0,184 €/m<sup>3</sup>** de agua tratada. La alternativa 1, oxidación total con eliminación biológica de fósforo, ha resultado tener el mayor coste de explotación, **0,208 €/m<sup>3</sup>**, debido al elevado consumo energético en agitación. Respecto a los costes de capital, la alternativa 2, tratamiento convencional de fangos activos con digestión aerobia de fangos y eliminación de fósforo por precipitación química, le corresponde el menor coste de capital, con una inversión total en infraestructuras de **1.882.834,76 €** y una cuota de **148.291,74 €/año**.
- Considerando en conjunto los costes de capital y de explotación, la **alternativa 2** se considera la alternativa idónea por su menor coste total anual, el cual asciende a **407.453,49 €** y un coste promedio de **0,29 €/m<sup>3</sup>** de agua residual tratada.
- Finalmente, cabe mencionar que la alternativa 1, oxidación total con eliminación biológica de fósforo, ha resultado ser la más costosa, con un coste total anual de **474.432,32 €**. Esto se debe a la necesidad de un volumen de reactor biológico considerablemente alto (casi cuatro veces mayor que el necesario en la alternativa 2), lo que conlleva un elevado coste de obra civil y un consumo energético en agitación considerable.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A. (2018). Tratamientos biológicos de aguas residuales (3a ed.). Universidad Politécnica de València.

Ferrer Polo, J. (2007). Tratamientos físicos y químicos de aguas residuales. Editorial UPV.

Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A., Aguado García, D., Ribes Bertomeu, J., Serralta Sevilla, J., García Usach, M. F., & Ruano García, M. V. (2011). Diseño y simulación de EDAR mediante el software DESASS. Editorial UPV.

Jiménez, J. (2019, 17 de noviembre). Acusan a encargados de la depuradora de sa Pobra por contaminar el agua de s'Albufera. Última Hora. Disponible en: <https://www.ultimahora.es/sucesos/ultimas/2019/11/17/1121599/acusan-encargados-depuradora-pobra-por-contaminar-agua-albufera.html>

Decret 4/1988, pel qual es declara Parc Natural s'Albufera de Mallorca. 28 de enero de 1988. Conselleria d'Agricultura i Pesca del Govern de les Illes Balears.

Frau, J. (2022, 30 de mayo). El Govern agilizará la ampliación de la depuradora de sa Pobra. Diario de Mallorca. Disponible en: <https://www.diariodemallorca.es/part-forana/2022/05/30/govern-agilizara-ampliacion-depuradora-sa-66712573.html>

Ballester, E. (2007, 30 de marzo). La potabilizadora de sa Pobra permite a los vecinos beber agua del grifo «sin riesgos». Disponible en: <https://www.ultimahora.es/noticias/part-forana/2007/03/30/496443/potabilizadora-pobra-permite-vecinos-beber-agua-del-grifo-riesgos.html>

ANDRITZ. Decanter centrifuge for environment. Disponible en: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges>

Balears Meteo. Informes Mensuales, Anuales y Comparativas de Sa Pobra. Disponible en: [http://www.balearsmeteo.com/sa\\_pobra/informes\\_mensuales\\_anuales.php](http://www.balearsmeteo.com/sa_pobra/informes_mensuales_anuales.php)

Tukey, J. W. (1977). Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Publishing Co.

Sánchez Ramírez, J. E. (2008). Estudio estadístico para la obtención de las relaciones necesarias entre parámetros analíticos de las aguas residuales para su caracterización según los modelos matemáticos de fangos activados [Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Valencia]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/13045>

Casas Boada, F. (2020). Análisis de la situación actual de la depuración de las aguas residuales urbanas en el estado español: estudio de alternativas de diseño de la EDAR del municipio de Nerja (Málaga) [Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Valencia]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/150842>

Puga Usucachi, E. V. (2016). Evaluación técnica económica de las alternativas para eliminación de los nutrientes fósforo y nitrógeno de la Estación depuradora de aguas residuales Camp de Turia II - Comunidad Valenciana [Tesis de Máster]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/67091>



Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Sa Pobla por simulación mediante el software DESASS



Cicek, N., Winnen, H., Suidan, M.T., Wrenn, B.E., Urbain, V. and Manem, J. (1998). Effectiveness of the membrane bioreactor in the biodegradation of high molecular weight compounds, *Wat. Res.* Vol. **32**. p. 1553-1563.