



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Optimización de la decantación primaria en la línea de
aguas para la mejora del consumo energético en el reactor
biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de
fangos para una EDAR de 450.000 HE

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Collado Nebot, Carlos

Tutor/a: Iborra Clar, Alicia

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi agradecimiento a mis padres; a mi hermana; a mis abuelos; a mis tíos y a mis primos, sin su apoyo, comprensión, cariño y por supuesto su inestimable ayuda en todo lo que he necesitado nunca hubiera llegado a buen puerto. Nunca os podré agradecer suficientemente todo el apoyo que me habéis dado y me seguís dando en esta aventura en la que me he embarcado.

También quiero agradecer a todos mis amigos que me han ayudado y animado durante la realización de este trabajo.

A su vez, quisiera agradecer su colaboración y apoyo a Pau Granell Muñoz y a María José Tárrega Martí que me han ayudado a finalizar con éxito esta experiencia.

Y por supuesto a mi tutora de Trabajo de Fin de Grado Alicia Iborra Clar por su apoyo e implicación en este.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en la optimización del proceso de tratamiento primario tanto de la línea de aguas como la de la línea de fangos en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de 450.000 HE. El objetivo principal es maximizar la reducción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la decantación primaria, garantizando en todo momento la materia carbonosa que facilite el proceso de desnitrificación en el reactor biológico. Con esta mejora en la línea de agua se incrementará el potencial de producción de biogás del fango primario y por tanto el de generación de energía eléctrica. Al optimizar el proceso de decantación primaria, se logra un doble beneficio, por un lado, un menor consumo de energía eléctrica en el reactor biológico y además un aumento en la producción de biogás. Este enfoque mejora la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales, así como, contribuye a la generación de energía renovable.

Palabras clave: Desnitrificación; Decantador; Reactor; Biogás; Fango; Agua; Optimización.

RESUM

El present Treball fi de grau se centra en l'optimitzaci3n del proc3s de tractament primari tant de la l3nia d'aig3es com la de la l3nia de fangos en una Estaci3n Depuradora d'Aig3es Residuals (EDAR) 450.000 HE. L'objectiu principal 3s maximitzar la reducci3n de Demanda Qu3mica d'Oxigen (DQO) en la decantaci3n prim3ria, garantint en tot moment la mat3ria carbonosa que facilite el proc3s de desnitrificaci3n en el reactor biol3gic. Amb esta millora en la l3nia d'aigua s'incrementar3 el potencial de producci3n de biog3s del fang primari i per tant el de generaci3n d'energia el3ctrica. En optimitzar el proc3s de decantaci3n prim3ria, s'aconsegueix un doble benefici, d'una banda, un menor consum d'energia el3ctrica en el reactor biol3gic i a m3s un augment en la producci3n de biog3s. Este enfocament millora l'efici3ncia del tractament de les aig3es residuals, aix3 com, contribu3x a la generaci3n d'energia renovable.

Paraules clau: Desnitrificaci3n; Decantador; Reactor; Biog3s; Fang; Aigua; Optimitzaci3n.

ABSTRACT

This Final Degree Project focuses on the optimization of the primary treatment process of both the water line and the sludge line in a Wastewater Treatment Plant (WWTP) 450,000 HE. The main objective is to maximize the reduction of Chemical Oxygen Demand (COD) in the primary settling, ensuring at all times the carbonaceous matter that facilitates the denitrification process in the biological reactor. This improvement in the water line will increase the biogas production potential of the primary sludge and therefore the generation of electricity. By optimizing the primary settling process, a double benefit is achieved, on the one hand, a lower consumption of electrical energy in the biological reactor and on the other hand, an increase in biogas production. This approach improves the efficiency of wastewater treatment, as well as contributes to the generation of renewable energy.

Keywords: Denitrification; Settler; Reactor; Biogas; Sludge; Water; Optimization

ÍNDICE

Documentos contenidos en el TFG

- Memoria
- Presupuesto
- Anexo

DOCUMENTO 1: MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	<i>Objeto del proyecto</i>	1
2.	<i>Justificación</i>	2
2.1.	Justificación energética	2
2.2.	Justificación medioambiental	2
3.	<i>¿Qué son los ODS?</i>	3
3.1.	Contribución del TFG a los ODS.....	3
4.	<i>Introducción</i>	5
4.1.	Características de las aguas residuales	7
4.2.	Necesidad de la depuración de las aguas residuales	8
4.3.	Legislación	8
4.3.1.	Legislación Europea	8
4.3.2.	Legislación Nacional.....	9
4.3.3.	Legislación Autonómica.....	10
4.4.	Tratamientos realizados	10
4.4.1.	Línea de agua	11
4.4.2.	Línea de fango.....	14
4.4.3.	Línea de gas.....	15
4.5.	Esquema de la planta	16
4.6.	Decantación primaria.....	17
5.	<i>Metodología</i>	21
5.1.	Materiales	21
5.2.	Método	22
5.2.1.	Punto de muestreo y periodicidad.....	22
5.2.2.	Protocolo de toma de muestras.....	24
5.2.3.	Procedimiento de análisis	24
6.	<i>Resultados</i>	28
6.1.	Resultados obtenidos para el agua decantada	28
6.2.	Resultados obtenidos para el fango primario	39
6.3.	Representaciones gráficas de interés.....	43
7.	<i>Conclusiones</i>	58
7.1.	<i>Implicaciones de los resultados</i>	60
7.2.	<i>Limitaciones</i>	60
8.	<i>Bibliografía</i>	61

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Caudal medio tratado. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales</i>	6
<i>Figura 2. Volumen de agua en un año. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.</i>	6
<i>Figura 3. Población equivalente servida. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.</i>	6
<i>Figura 4. Fango evacuado. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales</i>	7
<i>Figura 5. Diagrama de la línea de agua y de fango. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales</i>	10
<i>Figura 6. Tratamiento secundario. Fuente: GEDAR</i>	13
<i>Figura 7. Digestores anaerobios. Fuente: iAguas.</i>	15
<i>Figura 8. Diagrama de flujo de la EDAR. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.</i>	16
<i>Figura 9. Disposición de la planta. Fuente: EDAR</i>	16
<i>Figura 10. Fraccionamiento de la DQO. Fuente: Surcis.</i>	17
<i>Figura 11. Fraccionamiento de la DQO. Fuente: Surcis.</i>	18
<i>Figura 12. Fraccionamiento del fósforo. Fuente: Research Gate.</i>	18
<i>Figura 13. Decantador primario. Fuente: Hidrometálica.</i>	20
<i>Figura 14. Tomamuestras. Fuente: Propia.</i>	22
<i>Figura 15. Tuberías de impulsión de fango. Fuente: Propia.</i>	23
<i>Figura 16. Tuberías de impulsión de fango. Fuente: Propia.</i>	23
<i>Figura 17. Correlación entre el potencial Redox y la DQO.</i>	32
<i>Figura 18. Correlación entre el potencial Redox y el amonio.</i>	32
<i>Figura 19. Correlación entre el potencial Redox y la DQO soluble.</i>	33
<i>Figura 20. Correlación entre el potencial Redox y los ortofosfatos.</i>	33
<i>Figura 21. Correlación entre el potencial Redox y los sólidos suspendidos.</i>	34
<i>Figura 22. Correlación entre el potencial Redox y el caudal.</i>	34
<i>Figura 23. DQO total, DQO soluble, amonio, sólidos suspendidos y potencial redox frente a tiempo.</i>	43
<i>Figura 24. Ortofosfatos y potencial redox frente a tiempo.</i>	45

Figura 25. Correlaciones entre los diferentes parámetros.	46
Figura 26. Gráfico de dispersión entre la DQO y DQO soluble.	47
Figura 27. Gráfico de dispersión entre la DQO y los sólidos suspendidos.	48
Figura 28. Gráfico de dispersión entre el potencial redox y el amonio.	48
Figura 29. Gráfico de dispersión entre el potencial redox y la DQO.	49
Figura 30. Correlaciones entre el caudal y los parámetros	50
Figura 31. DQO y correlaciones.	51
Figura 32. DQO soluble y correlaciones.	52
Figura 33. Amonio y correlaciones.	53
Figura 34. Sólidos suspendidos y correlaciones.	54
Figura 35. Ortofosfatos y correlaciones.	55
Figura 36. Redox y correlaciones.	56
Figura 37. Caudal y correlaciones.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores límite de vertido de una EDAR	9
Tabla 2. Valores correctos de los patrones.....	25
Tabla 3. Interferencias en el análisis de amonio.....	26
Tabla 4. Interferencias en el análisis de ortofosfatos.	27
Tabla 5. Valores de los parámetros del agua decantada y potencial redox.	28
Tabla 6. Correlaciones entre los diferentes parámetros.....	31
Tabla 7. Correlación entre el caudal y los parámetros de manera global.	35
Tabla 8. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 27 de mayo.	36
Tabla 9. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 28 de mayo.	36
Tabla 10. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 29 de mayo.	36
Tabla 11. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 30 de mayo.	37
Tabla 12. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 31 de mayo.	37
Tabla 13. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 3 de junio.	38
Tabla 14. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 5 de junio.	38
Tabla 15. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº1	39
Tabla 16. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº3	40
Tabla 17. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº4	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Habitantes equivalentes.</i>	5
<i>Ecuación 2. Reacción de los nitratos y la DQO</i>	19
<i>Ecuación 3. Fórmula de la DQO necesaria.</i>	19
<i>Ecuación 4. Reacción de nitrificación.</i>	19
<i>Ecuación 5. Reacción de nitración.</i>	19
<i>Ecuación 6. Reacción de oxidación del amonio a nitratos.</i>	19
<i>Ecuación 7. Fórmula de los sólidos suspendidos.</i>	24
<i>Ecuación 8. Reacción de oxidación de la DQO.</i>	25
<i>Ecuación 9. Reacción de formación del indofenol azul</i>	26
<i>Ecuación 10. Reacción de formación del ácido fosfomolibdico</i>	26
<i>Ecuación 11. Reacción de formación del complejo azul de molibdato</i>	26
<i>Ecuación 12. Porcentaje de materia seca.</i>	27
<i>Ecuación 13. Porcentaje de materia volátil.</i>	27
<i>Ecuación 14. Fórmula de la DQO soluble respecto a la DQO.</i>	47
<i>Ecuación 15. Fórmula de los sólidos suspendidos respecto a la DQO.</i>	48
<i>Ecuación 16. Fórmula del amonio respecto al potencial de reducción-oxidación.</i>	49
<i>Ecuación 17. Fórmula de la DQO respecto al potencial de reducción-oxidación.</i>	49

1. OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) consiste en optimizar el proceso de decantación primaria para conseguir la máxima reducción de Demanda Química de Oxígeno (DQO), asegurando en todo momento la materia carbonosa que favorezca el proceso de desnitrificación en el reactor biológico.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Caracterizar el agua entrante al reactor biológico.
- Reducir el consumo energético en el reactor biológico.
- Aumentar el potencial de producción de biogás del fango primario.
- Buscar la correlación entre los diferentes parámetros del agua.
- Establecer la relación para calcular un parámetro a partir de otro.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1. Justificación energética

Con el aumento del precio de la energía eléctrica en estos últimos años, en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) el consumo de este tipo de energía supone un gran gasto económico. En el reactor biológico, durante el proceso de aireación, se consume alrededor del 50% de la energía de una EDAR.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales que tienen secado térmico como proceso para tratar el fango necesitan una gran cantidad de energía para poder realizar la deshidratación del fango. En España, son varias las EDAR que tienen el proceso de secado térmico parado debido al alto consumo de energía.

Por lo tanto, es necesario aumentar el potencial de producción de biogás del fango con el objetivo de una mayor producción de energía eléctrica para abastecer a los diferentes equipos usados en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Este aumento de producción de energía conlleva un menor consumo de la red eléctrica. Además, favorece a la utilización de energía renovable.

2.2. Justificación medioambiental

El medioambiente es el espacio que rodea a los seres vivos e influye tanto en su supervivencia como en su desarrollo. Hoy en día, una gran parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) están dirigidos hacia el cuidado de la naturaleza.

Por ello, existe la necesidad de tratar las aguas para reducir y eliminar sus contaminantes con el fin de preservar la naturaleza, así como la fauna marina y la terrestre. Por otra parte, una buena desinfección del agua lleva a que esta puede ser reutilizada para el riego de campos en el sector de la agricultura.

Obteniendo la máxima reducción de la Demanda Química de Oxígeno posible, se pretende facilitar la desinfección del agua en tratamientos posteriores, y así, obtener a la salida de la EDAR un agua que cumpla los parámetros establecidos por la ley correspondiente.

3. ¿QUÉ SON LOS ODS?

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 objetivos globales, compuestos de 169 metas, que tienen como fin alcanzar tres dimensiones del desarrollo sostenible de manera equilibrada. Estas tres dimensiones son:

- Ámbito ambiental.
- Ámbito económico.
- Ámbito social.

Dichos objetivos se establecieron por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el año 2015 y firmados por 193 países, superando así al protocolo de Kioto y a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM). Los ODS fueron previstos para poder cumplirlos en el plazo de los 15 años siguientes a su redacción, es decir, en el año 2030.

Específicamente, se pretende acabar con la pobreza, mejorar las vidas de las personas y proteger el planeta.

3.1. Contribución del TFG a los ODS

El presente TFG ayuda a alcanzar las metas mencionadas anteriormente contribuyendo con los tres ODS siguientes:

- Agua limpia y saneamiento (6): Este objetivo se basa en garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. El objetivo principal de una EDAR es reducir los contaminantes que porta el agua mediante diferentes tratamientos. Por ello, optimizar el proceso de decantación primaria favorece a una menor contaminación del efluente que conlleva un agua más limpia y en algunos casos, reutilizable para riego agrícola y otras actividades que ayudan a mantener los recursos hídricos y a gestionar el agua de manera más sostenible. Además, el tratamiento de las aguas residuales permite la eliminación de patógenos disminuyendo así la propagación de enfermedades.
- Energía asequible y no contaminante (7): Con este objetivo se pretende garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Tras pasar el agua por los decantadores primarios y secundarios se generan lodos primarios y secundarios respectivamente. Tras concentrarlos mediante un proceso de flotación, se introducen en un proceso de digestión anaerobia. En dicho proceso, se produce biogás que es utilizado para la generación de energía eléctrica mediante motores de cogeneración. Esta energía es utilizada para alimentar la propia planta, además de ser introducida en la red eléctrica. Por lo tanto, consiguiendo un fango primario más

concentrado contribuye a una mayor generación de biogás y, por consiguiente, de energía

- Vida submarina (14): Se tiene como objetivo conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible. Al verter la EDAR a una zona sensible como es la Albufera se tienen que controlar diferentes parámetros como son el fósforo y el nitrógeno. La reducción de estos dos elementos supone la protección de los medios marinos. Además, optimizar la decantación primaria puede suponer la disminución de nutrientes favoreciendo a que no haya eutrofización en las aguas, es decir, el crecimiento de algas nocivas que consuman el oxígeno del agua causando la muerte de diferentes especies de peces.

4. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más industrializado y urbanizado, la gestión sostenible del agua se ha convertido en un desafío crítico. La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) es un conjunto de instalaciones que tiene como objetivo la reducción de la contaminación en las aguas hasta cumplir los límites establecidos para el cauce receptor. Además, debe ser capaz de tratar los fangos producidos en los diferentes procesos de depuración.

El proceso de tratamiento de aguas en una EDAR generalmente consta de varias etapas. La contaminación que se pretende eliminar en estos tratamientos son los sólidos suspendidos, la materia orgánica, el fósforo, el nitrógeno y microorganismos patógenos.

Durante el proceso de reducción de contaminantes, se generan diferentes tipos de residuos. Principalmente, se producen residuos de cribado, aceites y grasas y fangos. La EDAR debe ser capaz de gestionar los residuos generados.

La planta en la que se lleva a cabo este TFG se encuentra situada en la comarca de la *Horta Sud*. Actualmente se encuentra explotada por la empresa Global Omnium Medio Ambiente. La estación depuradora recibe tanto aguas residuales industriales como aguas residuales urbanas.

Al inicio de su explotación servía a las localidades de Aldaia, Alaquàs, Xirivella, Quart de Poblet, Manises, Mislata y a una parte de València. Sin embargo, con la ampliación que se realizó en la EDAR de Pinedo, la EDAR de Quart Benàger dejó de recibir agua de Valencia.

La EDAR tiene un caudal de diseño de $60.000 \frac{m^3}{día}$ y 412.500 habitantes equivalentes (he). Para calcular los habitantes equivalentes hay que hacer uso de la siguiente ecuación:

$$he = Q \left(\frac{m^3}{día} \right) \cdot \frac{DBO_5 \left(\frac{g}{m^3} \right)}{60 \left(\frac{g}{m^3} \right)}$$

Ecuación 1. Habitantes equivalentes.

A continuación, se muestran el caudal medio diario, los habitantes equivalentes, el volumen total de agua recibido durante el año y los kilogramos de fango evacuados al año de los últimos 10 años:

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

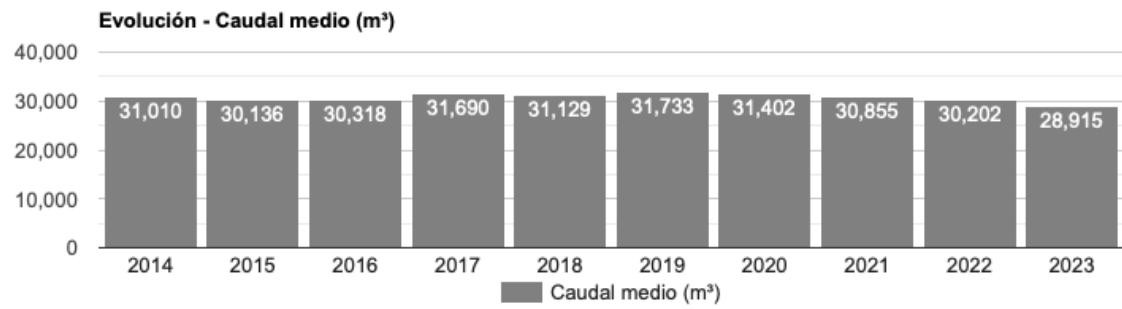


Figura 1. Caudal medio tratado. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales

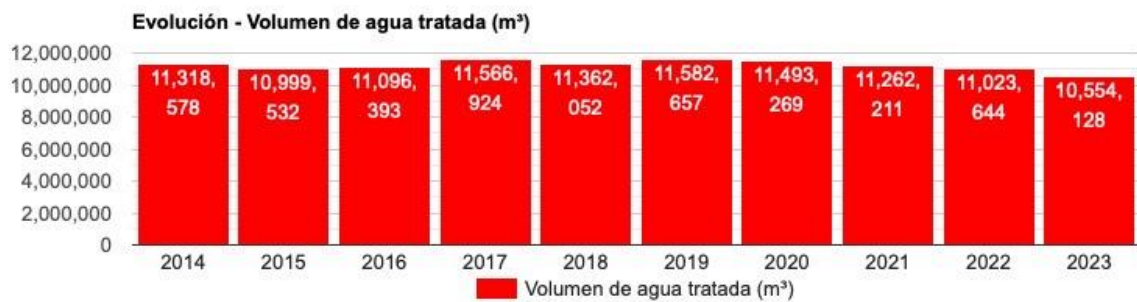


Figura 2. Volumen de agua en un año. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.

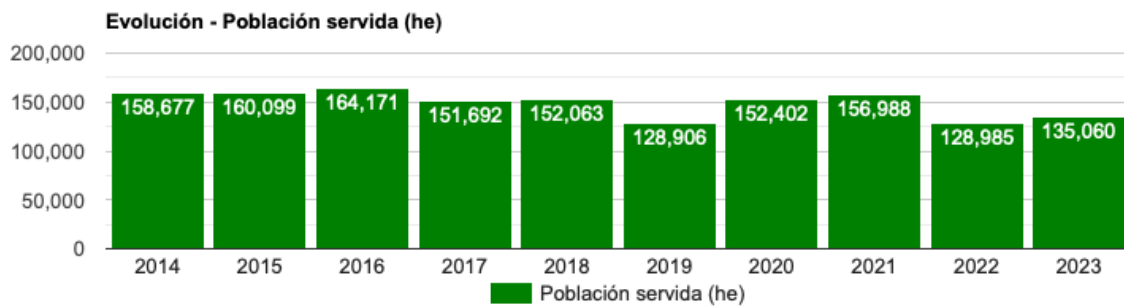


Figura 3. Población equivalente servida. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.

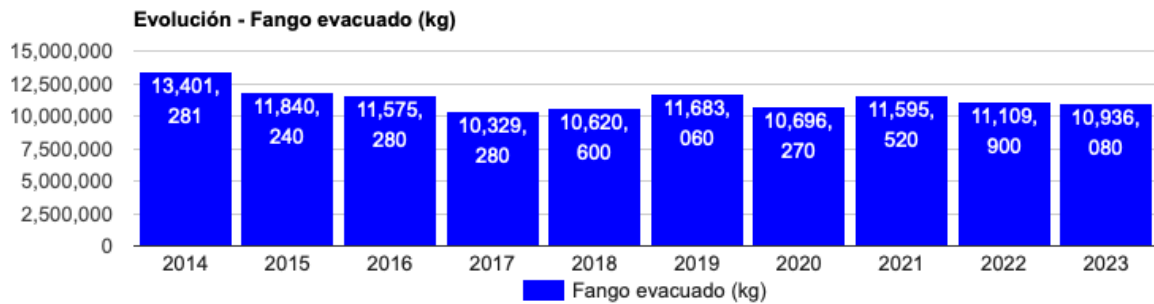


Figura 4. Fango evacuado. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales

Se observa que el caudal medio diario y el volumen de agua tratada en un año están directamente relacionados. Respecto al fango evacuado y la población servida, se observa que tienen una mayor dependencia de la carga contaminante del agua que del caudal.

4.1. Características de las aguas residuales

El agua natural utilizada para cualquier aplicación, aunque se le aporte tan solo calor, ya es agua residual. Cabe resaltar que no todos los aportes son perjudiciales, ya que, en ocasiones, hay que añadir sustancias químicas a las aguas naturales para acondicionarlas para un determinado uso.

Las características de un agua son el conjunto de parámetros que la caracterizan. Hay muchas características que definen un agua residual, pero pueden ser pocas las necesarias para caracterizarla. (Ortega y otros, 2003)

Los principales parámetros específicos con los que define el diseño, dimensionamiento y eficacia de los procesos que forman parte de una EDAR son:

- Materia orgánica.
- Nitrógeno amoniacal.
- Nitrógeno total Kjeldahl.
- Temperatura.
- pH.
- Turbidez.
- Nitratos.
- Fósforo.
- Sólidos en suspensión.

4.2. Necesidad de la depuración de las aguas residuales

Durante estos últimos años, el rápido crecimiento industrial y el cambio en las prácticas agrícolas han causado un aumento en la demanda de los recursos hídricos, así como el deterioro de la calidad de los mismos.

La degradación del medio ambiente hídrico es, actualmente, un factor limitante tanto para el desarrollo económico ya que afecta de manera negativa sus usos, que abarcan desde cualquier actividad recreativa hasta el abastecimiento público, afectando y modificando los ecosistemas.

El grado de contaminación de las aguas tiene relación con:

- Aguas residuales no tratadas.
- Vertidos industriales.

Por todo ello, el control y la supervisión de los vertidos supone actualmente una prioridad medioambiental.

Los principales objetivos para la gestión adecuada del agua son:

- Uso eficiente de los recursos hídricos.
- Protección de la calidad del agua.

4.3. Legislación

La legislación que regula las plantas de tratamiento de aguas residuales es necesaria para garantizar la protección del medio ambiente, así como de la salud pública. Las estaciones depuradoras desempeñan un papel vital a la hora de reducir los contaminantes en las aguas y en la conservación de los recursos hídricos. La normativa vigente establece los límites para operar de manera segura, abarcando aspectos como la calidad del agua y el control de vertidos.

Dicha legislación se establece tanto a nivel europeo, nacional y autonómica. Los organismos reguladores supervisan el cumplimiento de estas normas, imponiendo sanciones en caso de incumplimiento y promoviendo prácticas sostenibles.

4.3.1. Legislación Europea

En el ámbito europeo, esta legislación se rige por la directiva 91/271/CEE. Esta directiva define los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas. Establece las medidas necesarias que se han de adoptar para garantizar que las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento correcto previo a su vertido. Cabe destacar que esta directiva fue modificada por la directiva 98/15/CE en lo que se refiere a las especificaciones de los parámetros de vertidos en las zonas declaradas como sensibles.

Esta directiva detalla los valores máximos de DBO₅, DQO, sólidos en suspensión y contenido en fósforo y nitrógeno dependiendo del tipo de tratamiento realizado y del número de habitantes equivalentes.

A continuación, se muestra la tabla que recoge los valores límite para el caso explicado.

Tabla 1. Valores límite de vertido de una EDAR

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (b)	
DBO ₅ (c) (a 20° C sin nitrificación)	25 mg/L O ₂	70-90 %	
DQO	125 mg/L O ₂	75 %	
Total sólidos en suspensión	35 mg/L (d)	90 % (d)	
Parámetros	Concentración		Porcentaje mínimo de reducción (b)
	10.000 a 100.000 h-e	> 100.000 h-e	
Fósforo total	2 mg/L P	1 mg/L P	80 %
Nitrógeno total (c) (mg/L N)	15 mg/L N (d)	10 mg/L N	70-80 %

4.3.2. Legislación Nacional

A nivel nacional, cabe destacar el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas que tiene por objeto la transposición al ordenamiento interno la Directiva 91/271/CEE. Este decreto fue desarrollado posteriormente por el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, que incorporó los anexos de la Directiva 91/271/CEE que no habían sido añadidos previamente.

Con el objetivo de fijar las directrices de financiación del Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales 1995-2005 y garantizar la calidad de la depuración y del vertido de las aguas residuales urbanas según los criterios de la Unión Europea se publica la Resolución de 28 de abril de 1995.

El 8 de julio de 2007 el Consejo de Ministros aprobó el Plan Nacional de Calidad de Aguas: saneamiento y depuración 2007-2015.

La reutilización de las aguas residuales viene regulada por el Real Decreto 1620/2007, de 7 diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

En el caso particular del control de lodos, este se regula mediante el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, que establece las normas para el uso de lodos de depuración en el sector agrario y que transpone la Directiva 86/278/CEE. Además, la Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, referente a la utilización de lodos de depuración en el sector agrario, actualiza el contenido del Registro Nacional de Lodos y especifica la

información que deben proporcionar tanto las instalaciones depuradoras de aguas residuales como las instalaciones de tratamiento de lodos de depuración.

Los criterios de seguimiento y evaluación del estado de aguas residuales vienen recogidos en el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, así como las normas de calidad ambiental.

4.3.3. Legislación Autonómica

En el ámbito de la Comunidad Valenciana, el saneamiento de las aguas residuales se rige por la Ley 2/1992, de 26 de marzo, del Gobierno Valenciano para garantizar una actuación eficaz en relación con la evacuación, tratamiento y reutilización de las aguas residuales.

4.4. Tratamientos realizados

En el tratamiento de aguas residuales cabe destacar que existen tres líneas: la línea de agua, la línea de fango y la línea de gas. En cada una de las líneas se realizan tratamientos de diferente tipo.

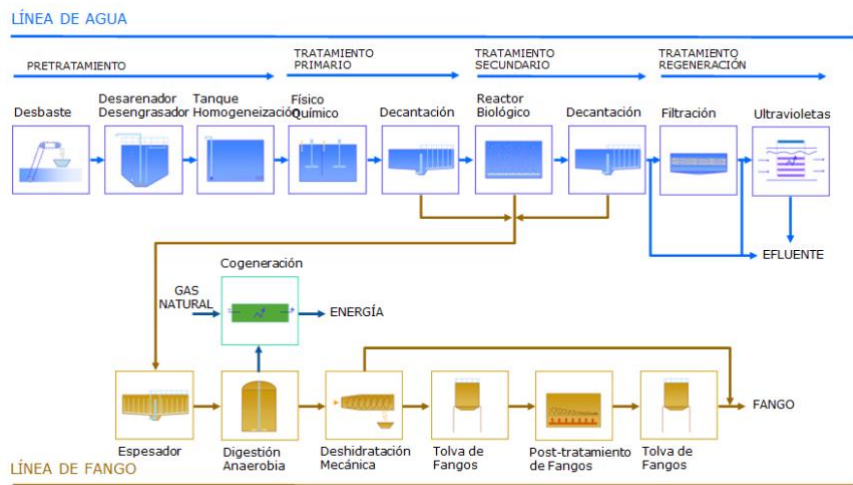


Figura 5. Diagrama de la línea de agua y de fango. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales

4.4.1. Línea de agua

En esta EDAR, como en la gran mayoría de plantas, el agua residual es sometida a cuatro tratamientos.

En primer lugar, pasa por el canal de entrada en el cual si aumenta el caudal de manera que supere las capacidades de la EDAR, el agua será desviada a un aliviadero y no será tratada.

Los cuatro tratamientos a los que es sometida el agua son pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

4.4.1.1. Pretratamiento

El principal objetivo del pretratamiento es la eliminación de sólidos de gran tamaño, aceites y grasas. Se pretende eliminar las impurezas que puedan afectar a los tratamientos posteriores. Además, con la eliminación de las arenas se evita la abrasión y obstrucción de los equipos.

En primer lugar, el agua llega al pozo de agua bruta y es elevada por 4 bombas que funcionan alternativamente. A continuación, el agua pasa por la etapa de desbaste donde atraviesa varias rejillas ordenadas de mayor tamaño a menor en las que quedan retenidos los sólidos de gran tamaño. Atendiendo a la luz de paso las rejillas se clasifican en:

- Rejillas de gruesos: 40 mm
- Rejillas de finos: 3 mm

Seguidamente, pasa por unos canales llamados desengrasadores y desarenadores donde se inyecta aire para disminuir la densidad del agua y facilitar la decantación de la arena y la flotación de las grasas. Finalmente, los residuos son recogidos en contenedores diferentes y gestionados por empresas externas.

Una vez eliminadas las impurezas, se introduce el agua en tres tanques de homogenización, de 6.000 m³ cada uno, con la función de igualar las propiedades del agua. También sirve como almacenamiento. Tras pasar por estas etapas se llega al tratamiento primario.

4.4.1.2. Tratamiento primario

En esta etapa se pretende reducir los sólidos suspendidos del agua residual. Como en general parte de los sólidos suspendidos están constituidos por materia orgánica, una de las consecuencias suele ser la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). Igualmente se puede conseguir una reducción de la contaminación bacteriológica.

El grado de tratamiento o nivel de reducción de estos índices de contaminación que se alcanza en un tratamiento primario depende del proceso utilizado y de las características de las aguas residuales.

Tras salir de los tanques de homogenización, el agua pasa por el tratamiento físico-químico donde se busca la reducción de metales pesados y de fósforo con la adición de cloruro férrico (FeCl_3). Dentro de este tratamiento, se realiza el proceso de coagulación-floculación. En primer lugar, se lleva a cabo la coagulación que consiste en la desestabilización de las partículas suspendidas y las coloides. Posteriormente, se realiza el proceso de floculación, con la adición de policloruro de aluminio (PaCl), que consiste en agrupar las partículas desestabilizadas para que puedan decantar tras entrar en los decantadores.

A continuación, el agua entra en los decantadores primarios. En este caso, se cuenta con cuatro. En dichos decantadores, los sólidos suspendidos en el agua decantan por gravedad formando el lodo o fango primario que se evacua hacia el tratamiento de fangos. Seguidamente, el agua residual entra en los tornillos de Arquímedes para bombearla hasta el reactor biológico donde se llevará a cabo el tratamiento secundario.

Cabe destacar que solo se encuentran en funcionamiento tres decantadores debido a que no hay suficiente carga másica como para que trabajen los cuatro a la vez.

4.4.1.3. Tratamiento secundario

Se trata de un tratamiento biológico con el objetivo de eliminar o reducir la contaminación orgánica mediante la intervención de microorganismos que actúan sobre la materia orgánica e inorgánica, suspendida, disuelta y coloidal existente en el agua residual, transformando la materia orgánica en CO_2 y H_2O y la materia inorgánica en sólidos sedimentables que pueden separarse fácilmente en el decantador secundario.

El tratamiento biológico puede llevarse a cabo por diferentes procesos, pero en esta EDAR se realiza mediante fangos activos con la variante nitrificación-desnitrificación. En este proceso, pueden distinguirse dos operaciones diferenciadas, la oxidación biológica y la separación sólido-líquido.

La primera de ellas tiene lugar en el reactor biológico o cuba de aireación, donde se provoca el desarrollo de un cultivo biológico formado por gran número de microorganismos agrupados en flóculos. La población bacteriana se mantiene en un determinado nivel para llegar a un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos existentes en el reactor, es lo que se define como carga másica

El nitrógeno presente en el agua residual se encuentra en forma de amonio. El proceso de nitrificación consiste en que las bacterias nitrificantes (quimioautótrofas) lo degraden

de manera aerobia a nitratos. El proceso de desnitrificación se basa en la transformación de los nitratos en nitrógeno libre, para que este se libere a la atmósfera. La desnitrificación la realizan microorganismos facultativos heterótrofos como afirman Ronzano y Dapena (2002) tratamiento biológico de las aguas residuales

El proceso de fangos activos necesita para su desarrollo un sistema de aireación y agitación, que suministre el oxígeno necesario mediante aire insuflado, para la acción depuradora de las bacterias aerobias, que evite la sedimentación de los flóculos en el reactor y permita la homogeneización de los fangos.

Una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, el licor mezcla (agua de salida del reactor biológico) se envía al decantador secundario en el que se separan el agua depurada y los fangos floculados. Estos últimos se recirculan al reactor biológico para mantener en este una concentración suficiente de bacterias. El fango en exceso se extrae y se dirige hacia el tratamiento de fangos.

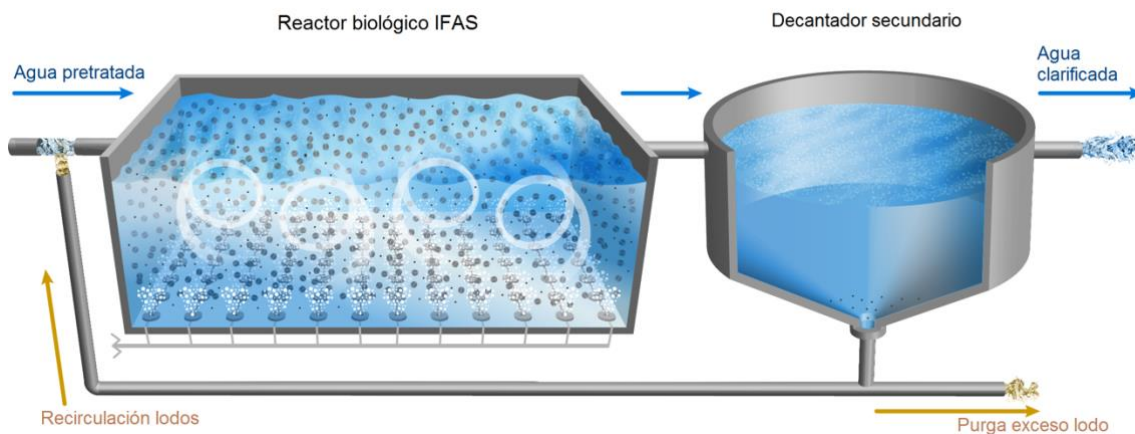


Figura 6. Tratamiento secundario. Fuente: GEDAR

4.4.1.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario tiene como objetivo eliminar las sustancias contaminantes no eliminadas en el tratamiento secundario y eliminar los posibles patógenos existentes. Además, permite la reutilización del agua como recurso hídrico alternativo.

En esta EDAR, el efluente de la decantación secundaria es mezclado con policloruro de aluminio (PAC) para flocular las partículas suspendidas que no han podido ser eliminadas anteriormente.

Seguidamente, el agua entra en los filtros de arena con la finalidad de retener las partículas que no han podido ser eliminadas durante los tratamientos anteriores.

Tras pasar los filtros de arena, el agua es dirigida a las lámparas ultravioletas con la finalidad de eliminar los microorganismos patógenos.

Tras someter al agua a todos los tratamientos anteriores, finalmente puede ser vertida al cauce receptor. En este caso, el agua es utilizada para el riego de los campos de los alrededores, así como, conducida al lago natural de la Albufera.

4.4.2. Línea de fango

La depuración de las aguas residuales tiene como consecuencia la producción de fango. Cabe la necesidad de diferenciar los dos tipos de fango existentes:

- Fangos primarios: son aquellos formados por los sólidos sedimentados en la decantación primaria.
- Fangos secundarios: producidos en el proceso de tratamiento biológico y evacuados en la decantación secundaria.

En primer lugar, se lleva a cabo el espesamiento que consiste en el aumento de la concentración de los fangos mediante la eliminación de agua, consiguiendo así la reducción del volumen de los mismos y el incremento de la eficacia de los procesos posteriores. El método utilizado para realizar el espesamiento, de los fangos biológicos o secundarios, es la flotación, que consiste en la separación de las partículas sólidas de las líquidas mediante la insuflación de burbujas de aire. Las burbujas se adhieren a las partículas de los fangos que por diferencia de densidad flotan. El espesamiento de los fangos primarios se realiza mediante un espesador de gravedad en el cual los fangos decantan. Seguidamente, ambos tipos de fangos son enviados a la etapa de estabilización.

La estabilización consiste en la eliminación parcial o total de la materia orgánica, y de la materia de evolución rápida que conduce a la emisión de malos olores, mediante la acción de microorganismos. Esta etapa se efectúa mediante digestión anaerobia, basada en la conversión de la materia orgánica en metano (CH_4) en dos etapas. En la primera, las proteínas, carbohidratos y grasas son transformados en ácidos grasos mediante las bacterias formadoras de ácidos. En la segunda, las bacterias metánicas forman ácidos orgánicos y los transforman en metano (CH_4). Se realiza a una temperatura de 38-40°C como afirma Sanz (2014) digestión anaerobia de fangos de EDAR, problemas y soluciones.

Cabe destacar que el fango que se encuentra en el interior del digestor se encuentra en agitación. Esta agitación se lleva a cabo mediante bombas llamadas Dinomix, que extraen el fango de la parte inferior para recircularlo a la parte superior del digestor.

Además, en esta EDAR, se realiza el proceso de codigestión, en el cual se introducen en el digestor residuos con una DQO elevada para aumentar la producción de gas.

Una vez estabilizado el fango, se procede con la deshidratación del mismo. Esta consiste en la eliminación de agua para convertirlo en un residuo sólido con facilidad de

transporte. Se realiza mediante secado térmico que consiste en la evaporación del agua existente en los fangos mediante el aporte de energía térmica. En esta EDAR es un secado de alta temperatura con una calidad de evaporación de 4.000 l/h con un proceso de contacto-convección.

Finalmente, el fango es utilizado para la agricultura como abono tras ser compostado y también es usado en el sector del cemento.



Figura 7. Digestores anaerobios. Fuente: iAguas.

4.4.3. Línea de gas

Como se ha mencionado anteriormente, en la digestión anaerobia se genera metano (CH_4). Este gas es utilizado como combustible para los motores de cogeneración. La cogeneración radica en a partir del gas obtener energía eléctrica y energía térmica útil.

Por una parte, para llevar a cabo la digestión anaerobia del fango es necesario aportar calor. Por lo tanto, la energía térmica generada, junto a varias calderas, es utilizada para ello.

Por otra parte, la energía eléctrica generada se utiliza para el propio consumo de la EDAR, ya sea para tener luz, utilizar los diferentes equipos, etc... Alrededor del 50-60% de la energía empleada en la EDAR es la producida por los dos motores de cogeneración.

Cabe destacar que el gas es almacenado en tres depósitos, y, en el caso de que sobre gas es quemado por una antorcha y liberado a la atmósfera.

Sin la producción de biogás, el secado térmico del fango sería inviable ya que con los actuales precios del gas supondría un gran gasto económico.

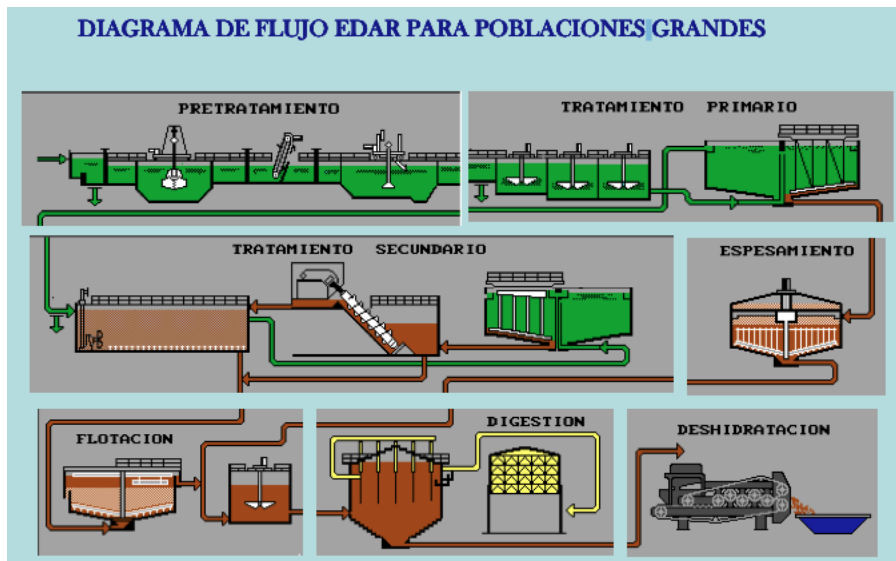


Figura 8. Diagrama de flujo de la EDAR. Fuente: Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales.

4.5. Esquema de la planta

A continuación, se puede observar cómo se encuentra organizada la EDAR donde se lleva a cabo este TFG:

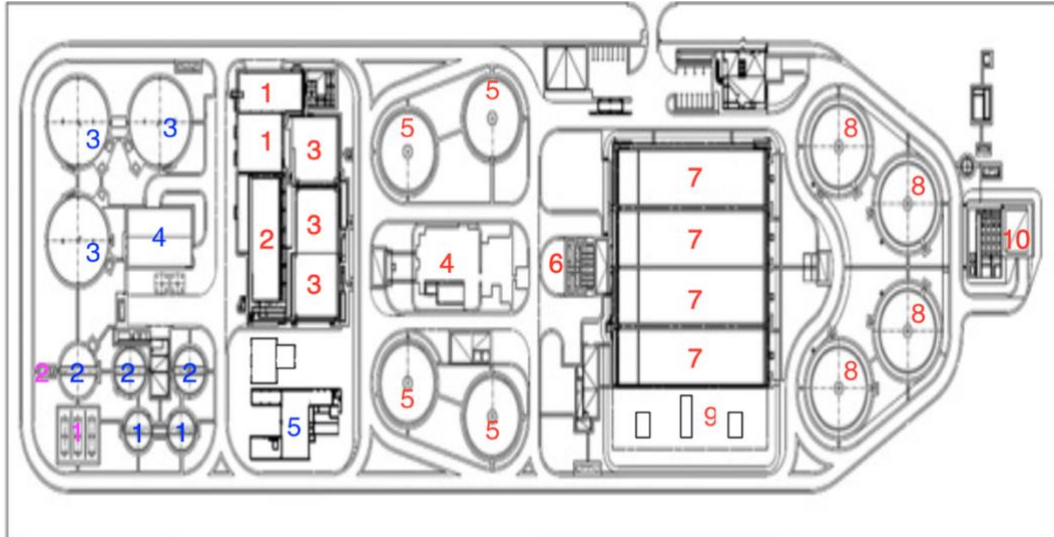


Figura 9. Disposición de la planta. Fuente: EDAR

En color rojo se muestra como están ubicadas las diferentes instalaciones donde se realizan los tratamientos al agua residual:

1. Pretratamiento.
2. Desarenador/Desengrasador.
3. Tanques de homogenización.

4. Tratamiento fisicoquímico.
5. Decantadores primarios.
6. Tornillos de Arquímedes.
7. Reactores biológicos.
8. Decantadores secundarios.
9. Filtros de arena.
10. Lámparas ultravioletas.

La línea de fango viene representada en color azul.

1. Espesador de gravedad.
2. Flotador.
3. Digestores anaerobios.
4. Calderas.
5. Secado térmico.

En color rosa se muestran las instalaciones de la línea de gas

1. Depósitos de gas.
2. Antorcha.

4.6. Decantación primaria

La calidad del agua es fundamental para una buena gestión de los recursos hídricos y para el tratamiento de las aguas residuales. Esta calidad viene definida por los diferentes parámetros que caracterizan el agua. En este estudio se pretende analizar la Demanda Química Orgánica (DQO), la DQO soluble, los ortofosfatos (PO_4^{3-}), el amonio (NH_4), los sólidos suspendidos y el potencial de reducción-oxidación.

A continuación, se muestra el fraccionamiento de los diferentes parámetros estudiados.

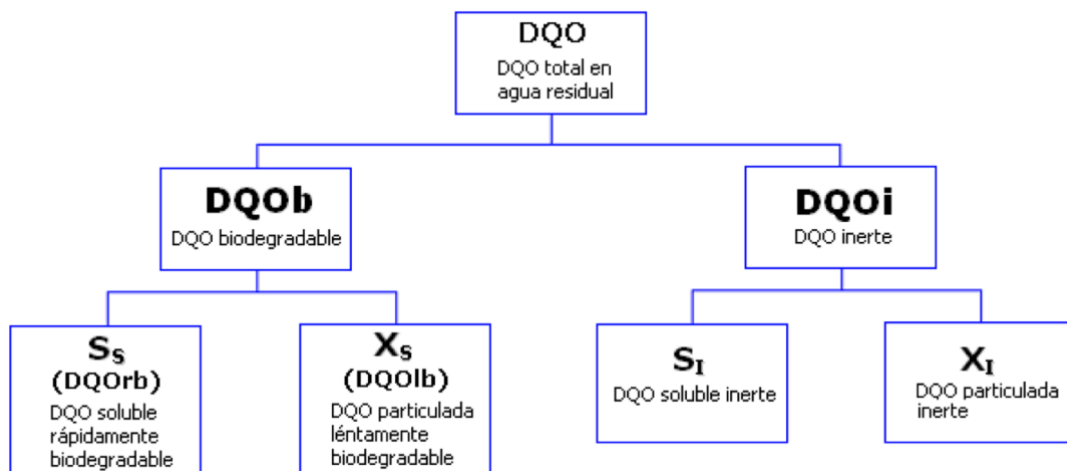


Figura 10. Fraccionamiento de la DQO. Fuente: Surcis.

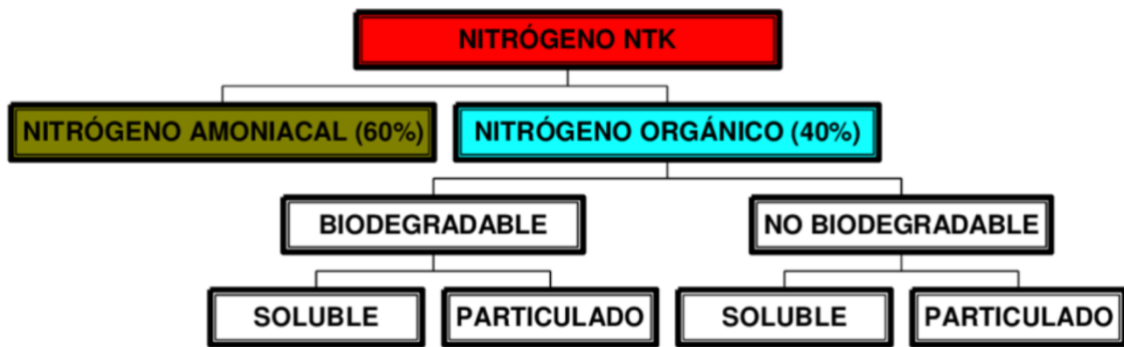


Figura 11. Fraccionamiento de la DQO. Fuente: Surcis.

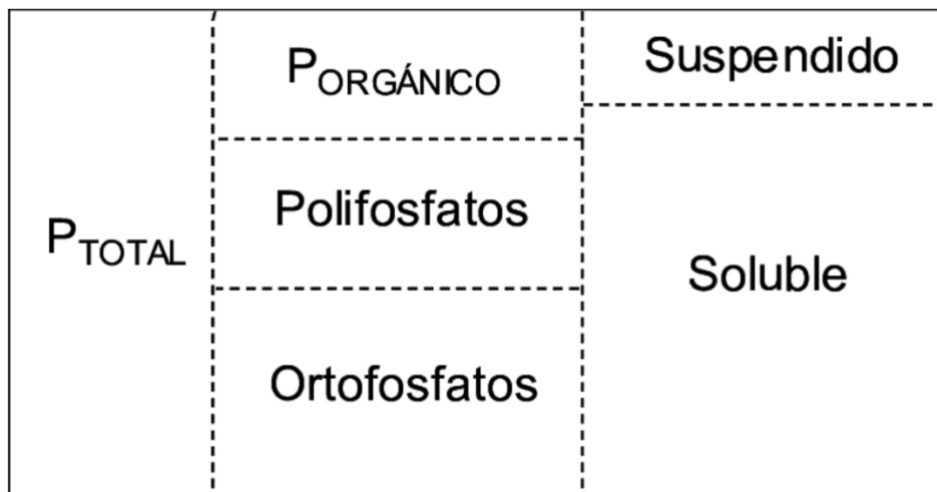


Figura 12. Fraccionamiento del fósforo. Fuente: Research Gate.

El caudal de entrada a la EDAR tiene gran importancia en las concentraciones de los parámetros mencionados anteriormente. Para ello, se van a estudiar las correlaciones existentes entre los diferentes parámetros. El análisis de correlaciones permite conocer como están relacionados entre sí los diferentes indicadores de calidad del agua y como responden frente a caudales altos, bajos o medios.

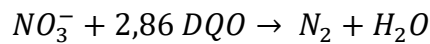
Los parámetros se van a relacionar principalmente con el potencial redox ya que es un gran indicador de la contaminación del agua. Un menor potencial de reducción-oxidación indica una mayor contaminación del agua residual.

Se espera que exista gran correlación entre la DQO y la DQO soluble, así como, entre el amonio y los ortofosfatos con el potencial de reducción-oxidación ya que dependiendo del potencial del agua habrá mayor o menor concentración de estos contaminantes.

Con la optimización de la decantación primaria se busca reducir el consumo de energía, especialmente durante la fase de aireación del reactor biológico, al disminuir la DQO entrante al reactor. Sin embargo, se debe garantizar en todo momento la presencia de

suficiente materia carbonosa para facilitar los procesos de desnitrificación - nitrificación. Reducir la DQO entrante al reactor implica una menor necesidad de energía para descomponer la materia orgánica.

Para conocer la materia orgánica que se necesita para llevar a cabo el proceso de desnitrificación-nitrificación en el reactor biológico, hay que basarse en la siguiente reacción química:



Ecuación 2. Reacción de los nitratos y la DQO

Por lo tanto, conociendo la concentración de nitratos, se puede conocer la concentración de DQO necesaria a partir de la siguiente fórmula:

$$DQO_{necesaria} = 2.86 \cdot [NO_3^-]$$

Ecuación 3. Fórmula de la DQO necesaria.

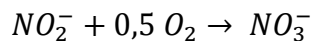
Como se van a medir los valores de amonio de las muestras de agua decantada, es necesario relacionarlo con la concentración de nitratos. Se relacionan a partir de las siguientes reacciones químicas:

- Nitritación:



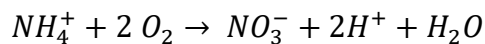
Ecuación 4. Reacción de nitritación.

- Nitración:



Ecuación 5. Reacción de nitración.

Combinando las dos reacciones anteriores, la concentración de nitratos viene dada por:



Ecuación 6. Reacción de oxidación del amonio a nitratos.

Por lo tanto, la concentración de nitratos es igual a la concentración de amonio siempre que la nitrificación sea completa.

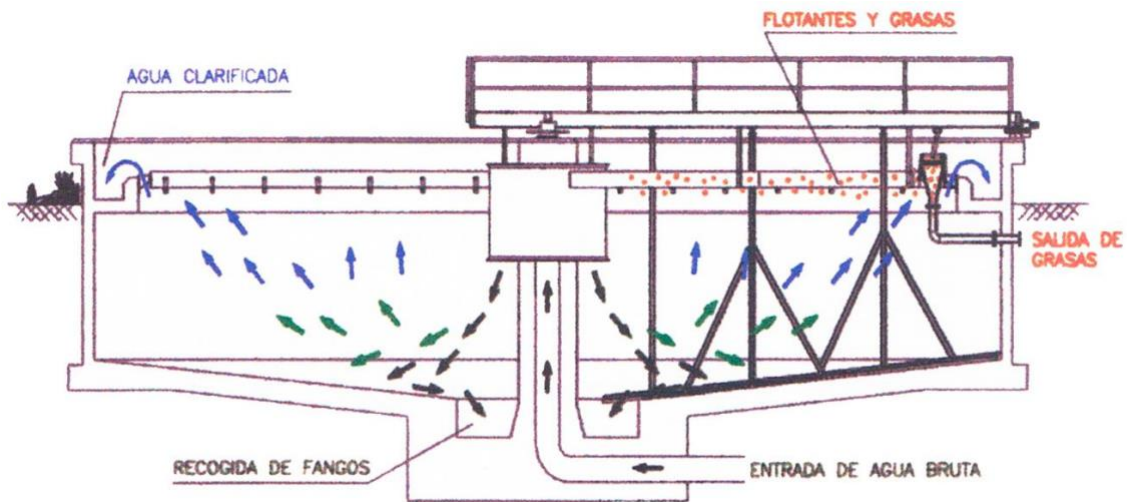


Figura 13. Decantador primario. Fuente: Hidrometálica.

Toda la materia orgánica que no entra al reactor biológico sale formando parte de los fangos primarios. Por lo tanto, los fangos con mayor concentración de DQO tienen un mayor potencial de producción de biogás que conlleva una mayor producción de energía eléctrica mediante motores de cogeneración.

Por una parte, se va a estudiar la composición de los fangos además de la DQO, DQO soluble, los ortofosfatos y el amonio de cada decantador. Además, se va a analizar el comportamiento del agua de salida de la decantación durante un período de tiempo de dos semanas. Para ello se van a recoger muestras de manera diaria monitorizando el potencial de reducción-oxidación (redox) del agua.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales

El material utilizado durante este trabajo fin de grado ha sido el siguiente:

- Tomamuestras automático portátil. Se encarga de recoger las muestras de agua de manera automática.
- Sonda REDOX. Mide los valores del potencial de oxidación-reducción del agua.
- Medidor portátil. Registra los valores medidos, en este caso por la sonda redox.
- Botellas de plástico de 500 mL. Estas han sido utilizadas para la recolección de las muestras obtenidas por el tomamuestras automático.
- Filtros. Su función es retener los sólidos suspendidos del agua residual recolectada.
- Pipeta automática de 1000 μ L y 5000 μ L. Permite el transvase del agua residual y de los reactivos de manera precisa.
- Viales de análisis de DQO. Se lleva a cabo el análisis de la DQO.
- Viales de análisis de ortofosfato. Se realiza en él el análisis de los ortofosfatos.
- Viales de análisis de amonio. Sirve para realizar el análisis del amonio.
- Digestor de muestras. Es utilizado para digerir las diferentes muestras. Sólo se digieren los viales de DQO y DQO soluble.
- Espectrofotómetro. Permite leer la concentración de DQO, DQO soluble, amonio y ortofosfatos.
- Recipientes de cerámica. Son utilizados para introducir en ellos el fango recolectado.
- Balanza. Es usada para pesar los filtros y las muestras de fango antes y después de la estufa con el fin de obtener la concentración de sólidos suspendidos.
- Estufa. Sirve para secar los filtros y las muestras de fangos.
- Mufla. Utilizado para incinerar los fangos.
- Bomba de filtración. Utilizada para filtrar las diferentes muestras.
- Filtros de bailarina. Su función es retener las impurezas de las muestras de aguas.
- Jeringuillas. Para inyectar las muestras en los filtros de bailarina.
- Vasos de precipitado de 250 mL. Su función es almacenar las muestras filtradas.



Figura 14. Tomamuestras. Fuente: Propia.

5.2. Método

5.2.1. Punto de muestreo y periodicidad

Por una parte, el punto de muestreo del agua decantada se localiza en la salida de los decantadores primarios, previa al reactor biológico. Las muestras han sido tomadas por el tomamuestras automático cada hora durante dos semanas. El medidor portátil ha registrado los valores del potencial REDOX del agua cada 15 minutos durante dos semanas. Observando los datos registrados por el medidor, se han seleccionado las muestras para analizar en el laboratorio.

Por otra parte, las muestras de fango han sido recogidas de las tuberías de impulsión de fango de cada decantador primario. Para cada decantador se han recolectado 5 muestras diferentes ya que cada uno tiene un tiempo de purga de 20 minutos. La recolección de las muestras de fango se ha realizado durante las dos mismas semanas, pero con la diferencia de que se ha hecho de manera alterna.

Además, los mismos días que se han recogido las muestras de fango, se ha recogido una muestra de agua del rebose de cada decantador.

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

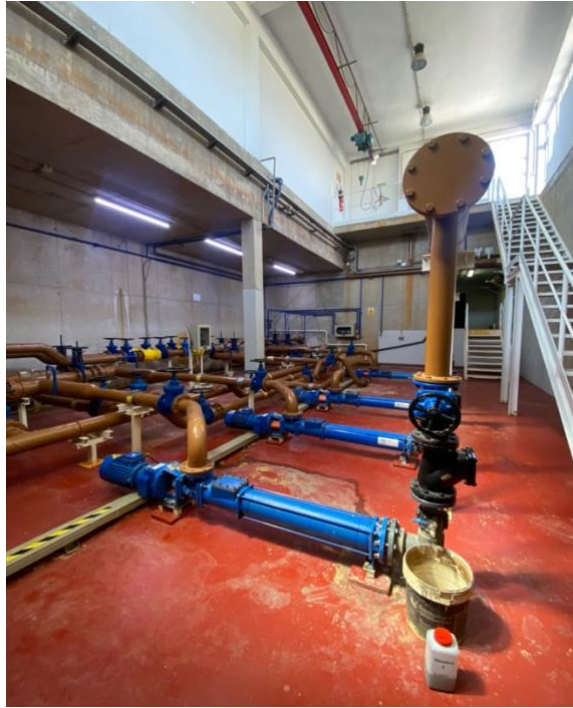


Figura 15. Tuberías de impulsión de fango. Fuente: Propia.



Figura 16. Tuberías de impulsión de fango. Fuente: Propia.

5.2.2. Protocolo de toma de muestras

El proceso de toma de muestras se ha iniciado con la colocación de los equipos de protección personal, incluyendo guantes y bata, para asegurar un entorno de trabajo seguro. Simultáneamente, se ha preparado y verificado todo el material necesario para la recolección de muestras. Posteriormente, se ha identificado la ubicación y el punto de muestreo.

Debido a las variaciones de caudal de la EDAR se establece que la duración del experimento sea de dos semanas.

Por una parte, se ha procedido a la programación del tomamuestras portátil para que recogiese una muestra cada hora durante 24 horas. Por otra parte, se ha introducido la sonda redox en el agua para que el medidor portátil tome valores del potencial de redox. Una vez transcurridas las 24 horas y seleccionadas las muestras, estas han sido transportadas para ser analizadas en el laboratorio.

Por lo que respecta a las muestras de fangos primarios, se ha procedido a la toma de muestras en las tuberías de impulsión de fangos de los decantadores primarios y en el rebose de agua de los mismos. Cada muestra ha sido registrada con su respectiva hora de recolección para mantener un seguimiento preciso.

5.2.3. Procedimiento de análisis

Los parámetros que han sido analizados de las muestras de agua son los sólidos suspendidos, la DQO total, la DQO soluble, el ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) y el amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$).

En primer lugar, se han pesado 12 filtros de papel y se han filtrado 50 mililitros de las muestras utilizando un sistema de filtración a vacío. Los filtros se han sometido a un proceso de secado en la estufa durante 2 horas. Luego, se han pesado nuevamente y se ha obtenido la concentración de sólidos suspendidos en mg/L a partir de la ecuación 7.

$$[\text{Sólidos suspendidos}] = \frac{\text{Peso filtro seco} - \text{Peso Inicial del filtro antes de la filtración}}{\text{Volumen filtrado}}$$

Ecuación 7. Fórmula de los sólidos suspendidos.

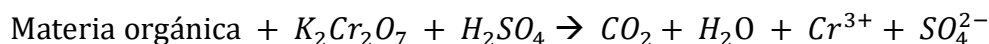
Antes de realizar los diferentes análisis de los parámetros, se han llevado a cabo dos patrones de calibrado para cada uno de los análisis. Después de verificar la corrección de los patrones con un espectrofotómetro se ha procedido con el resto de los análisis.

La realización de los patrones ha consistido en pipetear la cantidad indicada en cada kit en los viales y seguir los pasos que se indican para cada ensayo. Tras seguir el protocolo, se han introducido los viales en el espectrofotómetro. Los valores medidos deben estar dentro del rango que indica el fabricante. A continuación, se muestran los valores entre los que deben estar los patrones.

Tabla 2. Valores correctos de los patrones.

Parámetro	Rango
DQO total y DQO soluble	1000 ± 40
Ortofosfatos	10 ± 1
Amonio	25 ± 1,5

El fundamento analítico de la DQO se basa en la oxidación completa de la materia orgánica haciendo uso de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido. Durante dicha reacción el dicromato potásico se reduce a sulfato de cromo (Cr^{3+}) y la materia orgánica se oxida a dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



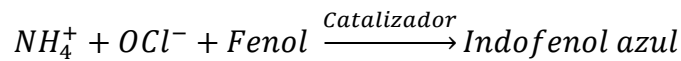
Ecuación 8. Reacción de oxidación de la DQO.

La principal interferencia que puede tener este método es la presencia de cloruros en el agua residual.

Para realizar el análisis de la DQO total se ha hecho uso del kit de HACH LCK 514. En primer lugar, se han agitado las muestras y se han tomado 2 mililitros haciendo uso de una pipeta automática. Esta muestra se ha introducido en un vial que contenía dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) y luego se han colocado en un digestor de muestras durante 15 minutos a 175°C. Después de dejar enfriar las muestras hasta que llegaran a temperatura ambiente, se han medido los valores en el espectrofotómetro.

En relación con el análisis de la DQO soluble, se ha seguido el mismo procedimiento que en el análisis de la DQO total, con la diferencia de que las muestras han sido filtradas previamente.

El análisis del amonio se basa en el método de azul de indofenol. Este método se basa en la reacción del amonio presente en el agua residual con hipoclorito y fenol para dar lugar a azul de indofenol. La intensidad del color azul de este producto es directamente proporcional a la concentración de amonio. La reacción química es la siguiente:



Ecuación 9. Reacción de formación del indofenol azul

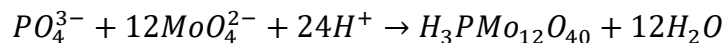
Dependiendo de la concentración de diferentes compuestos en la muestra de agua pueden existir diferentes interferencias. A continuación, se muestra un resumen de todas ellas:

Tabla 3. Interferencias en el análisis de amonio.

Nivel de interferencia	Sustancia interferente
1000 mg/L	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻
500 mg/L	K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺
50 mg/L	CO ₃ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Fe ³⁺ , Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Co ²⁺ , Ni ²⁺ , Hg ²⁺
25 mg/l	Fe ²⁺
10 mg/L	Sn ²⁺
5 mg/l	Pb ²⁺
2 mg/L	Ag ⁺

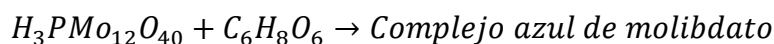
Para la realización del análisis de amonio, se ha utilizado del kit de HACH LCK 303. En primer lugar, se ha pipeteado 0,1 mililitros, de las muestras que habían sido filtradas previamente. A continuación, se han agitados todos los viales y se ha esperado 15 minutos. Trascurrido este tiempo, se han medido los valores en el espectrofotómetro

El análisis de los ortofosfatos presentes en el agua residual se basa en el método de azul de fosfomolibdeno. Este método se encuentra dividido en dos etapas. En primer lugar, el ortofosfato (PO_4^{3-}) reacciona con el molibdato para dar lugar al ácido fosfomolibdico ($H_3PMO_{12}O_{40}$). Esta etapa viene dada por la siguiente reacción:



Ecuación 10. Reacción de formación del ácido fosfomolibdico

En segundo lugar; el ácido formado anteriormente se reduce mediante un ácido absorbico formando el complejo de azul de molibdato:



Ecuación 11. Reacción de formación del complejo azul de molibdato

La concentración de ortofosfatos es directamente proporcional a la intensidad del color azul.

De la misma manera que ocurría con la DQO y el amonio, para el análisis de los ortofosfatos también pueden existir interferencias.

Tabla 4. Interferencias en el análisis de ortofosfatos.

Nivel de interferencia	Sustancia interferente
20000 mg/L	SO ₄ ²⁻
10000 mg/L	Cl ⁻
1000 mg/L	K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺
500 mg/L	Mg ²⁺ , NO ₃ ⁻
50 mg/L	Co ²⁺ , Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , I ⁻ , NO ₂ ⁻ , Cd ²⁺ , Sn ⁴⁺ , NH ₄ ⁺ , Mn ²⁺ , Al ³⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , SiO ₂
25 mg/L	Ag ⁺
10 mg/L	Cr ³⁺
5 mg/L	Cr ⁶⁺

Para realizar el análisis de los ortofosfatos presentes en las muestras, se ha hecho uso del kit de HACH LCK 350. En primer lugar, se ha pipeteado 0,4 mililitros de las muestras que estaban filtradas en cada vial. En segundo lugar, se han añadido 0,5 mililitros de reactivo B en cada vial. Tras agitar todos los viales, se ha esperado 10 minutos y se ha procedido a medir los valores en el espectrofotómetro.

Por lo que respecta a las muestras de fango primario, se han pesado 15 recipientes de cerámica, distribuidos en 5 por decantador, donde se vertieron las muestras de fango. Después del vertido, se han vuelto a pesar y se han sometido a un proceso de secado en estufa durante 24 horas. Transcurrido este periodo, se han pesado y se ha obtenido el porcentaje de materia seca. La materia seca indica la cantidad total de sólidos presentes, tanto inorgánicos como orgánicos. El porcentaje de materia seca se rige por la siguiente fórmula:

$$Materia\ seca\ (\%) = \left(\frac{Peso\ del\ residuo\ seco}{Peso\ de\ la\ muestra\ húmeda} \right) \cdot 100$$

Ecuación 12. Porcentaje de materia seca.

Seguidamente, se han vuelto a introducir en la mufla a 550°C durante unas 2 horas para determinar el porcentaje de materia volátil. La materia volátil indica la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. Se basa en la siguiente fórmula:

$$Materia\ volátil\ (\%) = \left(\frac{Peso\ del\ residuo\ seco - Peso\ del\ residuo\ de\ incineración}{Peso\ de\ la\ muestra\ seco} \right) \cdot 100$$

Ecuación 13. Porcentaje de materia volátil.

La presencia de diferentes sales minerales puede tener interferencia en la determinación del porcentaje de materia volátil.

6. RESULTADOS

Las concentraciones de los diferentes parámetros estudiados (DQO, DQO soluble, amonio, ortofosfatos, sólidos suspendidos) se encuentran influidos por el caudal de entrada a la EDAR. Por lo tanto, se van a estudiar las correlaciones existentes entre ellos con el objetivo de tener monitorizada la DQO en todo momento para poder reducir su concentración de entrada al reactor garantizando en todo momento la presencia de materia carbonosa para llevar a cabo los procesos de nitrificación-desnitrificación.

Principalmente, los parámetros se van a relacionar con el potencial REDOX ya que es un gran indicador de la contaminación del agua.

Por una parte, un potencial REDOX del agua negativo indica que existe poca presencia de oxígeno en el agua. Esto significa que existe la presencia de nitratos, sulfuros y de microorganismos que consumen oxígeno.

El potencial REDOX negativo indica que el ambiente es más reductor, es decir, las especies química tienen mayor capacidad de donar electrones.

Por otra parte, un potencial REDOX positivo indica que existe una mayor concentración de oxígeno en el agua.

6.1. Resultados obtenidos para el agua decantada

Tras dos semanas de estudio se ha dispuesto de un total de 41 juegos de datos y un total de 41 muestras analizadas de agua decantada. A continuación, se detallan los resultados obtenidos:

Tabla 5. Valores de los parámetros del agua decantada y potencial redox.

Fecha	HORA	DQO	DQO sol	PO4	NH4-N	SS	REDOX
27/5/24	6:39	264	104	2,54	25,4	68	-118,3
27/5/24	9:39	422	194	3,83	37,9	44	-221,6
27/5/24	10:39	298	178	3,23	33,9	42	-148,2
27/5/24	22:39	399	147	3,64	49,4	74	-229,4
28/5/24	3:49	277	124	2,82	26,1	92	-195,9
28/5/24	5:39	311	172	2,96	32,3	86	-225,2
28/5/24	10:41	469	193	2,99	35,1	76	-302,6

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

28/5/24	11:41	391	175	3,5	32,4	82	-256,3
28/5/24	12:41	524	184	4,09	45,4	80	-263,3
28/5/24	15:41	536	316	5	56,4	108	-304,5
28/5/24	16:41	542	308	4,22	55,6	150	-269,8
28/5/24	19:41	556	306	5,01	57,8	118	-306,5
28/5/24	20:41	598	325	4,49	52,7	114	-303,1
28/5/24	22:41	605	299	4,48	54,7	104	-287,6
28/5/24	23:41	513	225	4,6	51	114	-296,2
29/5/24	8:41	460	363	5,2	50,8	112	-410,2
29/5/24	10:37	353	297	5,02	48,6	142	-337,8
29/5/24	13:37	482	239	8,21	70,8	132	-311,3
29/5/24	14:37	434	322	8,28	75,7	112	-290,5
29/5/24	19:37	492	330	8,69	69,1	138	-309,9
30/5/24	8:37	473	320	8,91	65,4	76	-413,4
30/5/24	10:19	387	55,8	7,69	55,8	106	-352,6
30/5/24	19:19	508	294	9	72,6	124	-434,5
31/5/24	3:19	529	306	10,9	73,8	112	-436,7
31/5/24	6:19	530	304	11,7	75,9	108	-442,2
31/5/24	7:19	544	307	12,4	78,8	110	-445,3
2/6/24	18:47	591	316	8,93	44,9	112	-467,8
2/6/24	22:47	352	143	5,25	32,7	110	-201,3
2/6/24	0:47	409	190	5,63	39	100	-257,7
3/6/24	3:47	421	172	5,8	42,4	78	-332,9
3/6/24	6:47	472	224	6,2	44,6	67	-413,9
3/6/24	10:21	235	121	5,1	22,3	60	-158,6
3/6/24	14:21	279	138	5,8	36,8	60	-258,6

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

3/6/24	19:21	596	278	6,3	41,2	126	-288,3
4/6/24	3:21	293	107	5,4	28,1	64	-265,3
4/6/24	8:21	319	152	5,7	32,4	108	-291,2
5/6/24	13:18	239	109	3,9	25,6	42	-298,2
5/6/24	19:18	269	127	4,1	32,9	64	-315,2
5/6/24	22:18	327	172	4,8	35	70	-321,5
6/6/24	4:18	320	173	4,3	36,9	72	-338,3
6/6/24	9:18	341	191	4,66	42,2	68	-354,1

En la tabla 5 se recogen los valores de los análisis de las muestras de agua decantada identificando cada valor con su fecha y hora de recogida. De manera simultánea, se ha monitorizado el potencial redox del agua obteniendo así los valores del potencial para la hora de recogida de las muestras.

Una vez analizados los diferentes parámetros del agua, se ha procedido a estudiar la correlación existente entre ellos mediante la herramienta EXCEL para finalmente, relacionarlos mediante una fórmula y poder conocer el valor de uno a partir de otro.

Una correlación cercana a 1 o a -1 significa que las variables tienen relación entre sí. Si la correlación es cercana a 0, no se encuentran relacionadas. Una correlación positiva lleva consigo el aumento o disminución de los parámetros de manera simultánea. Sin embargo, una correlación negativa tiene como significado el aumento de un parámetro y la disminución de otro a la vez.

Seguidamente se muestra la correlación existente entre los diferentes parámetros:

Tabla 6. Correlaciones entre los diferentes parámetros.

CORRELACIONES	
DQO-DQO SOL	0,8302
DQO-SS	0,7131
DQO SOL- PO4	0,5895
DQO-NH4	0,5115
DQO SOL-SS	0,4848
DQO SOL-NH4	0,4817
DQO-PO4	0,4772
PO4-NH4	0,4702
PO4-SS	0,3539
NH4-SS	0,3145
DQO-REDOX	-0,5276
DQO SOL-REDOX	-0,5687
NH4-REDOX	-0,6385
REDOX-SS	-0,3565

Se ha establecido un código de colores en el cual la alta correlación positiva es de color verde mientras que la alta correlación negativa es de color rojo. Por una parte, cabe destacar que las variables que mayor relación tienen entre sí son la DQO y la DQO soluble. Por otra parte, las variables menos relacionadas son el amonio (NH4) y los sólidos suspendidos (SS). Esto se debe a que el amonio es una forma soluble por lo que no se encuentra directamente relacionado con la concentración de sólidos suspendidos.

Para estudiar de manera más específica las correlaciones, se ha procedido a relacionar los parámetros analizados con el incremento de potencial de redox entre diferentes periodos de tiempo. Se ha realizado la correlación entre diferentes periodos de tiempo para analizar las variaciones de carga a lo largo de estos periodos relacionándolo en todo momento el caudal de entrada a la EDAR.

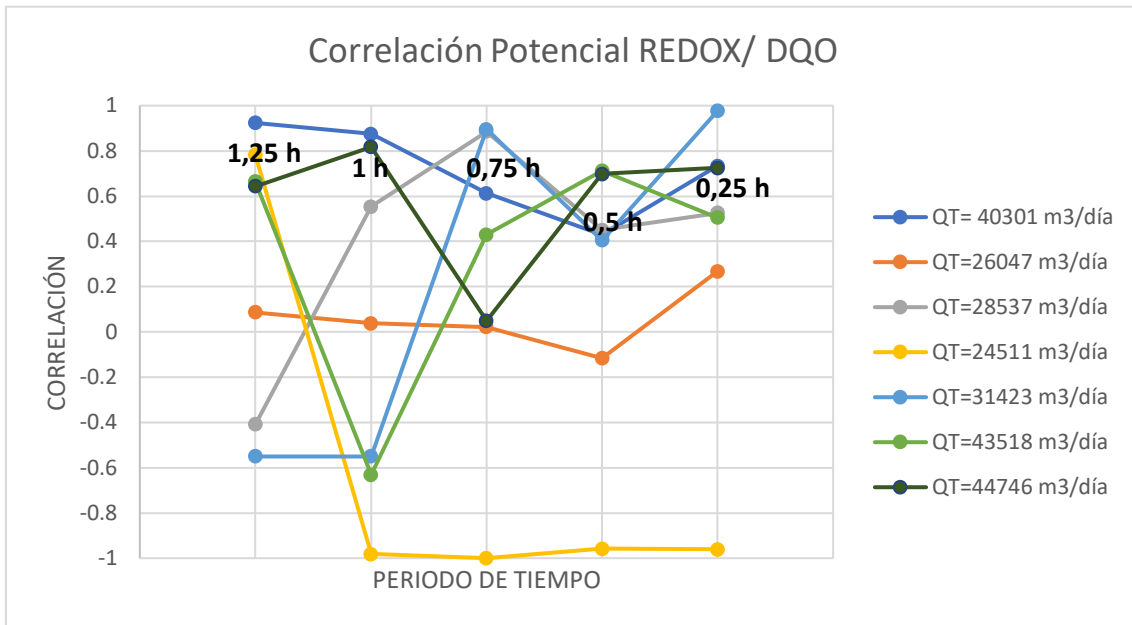


Figura 17. Correlación entre el potencial Redox y la DQO.

En la Figura 17 se observa que las altas correlaciones entre los incrementos de potencial REDOX y la DQO se dan cuando los caudales son bajos ($Q=26047 \text{ m}^3/\text{día}$) y altos ($Q=43518 \text{ m}^3/\text{día}$ y $Q=44746 \text{ m}^3/\text{día}$). Además, se puede determinar que, independientemente de periodo de tiempo en el que se ha estudiado el incremento de potencial redox, si el caudal es intermedio ($Q=26047 \text{ m}^3/\text{día}$) la correlación es baja.

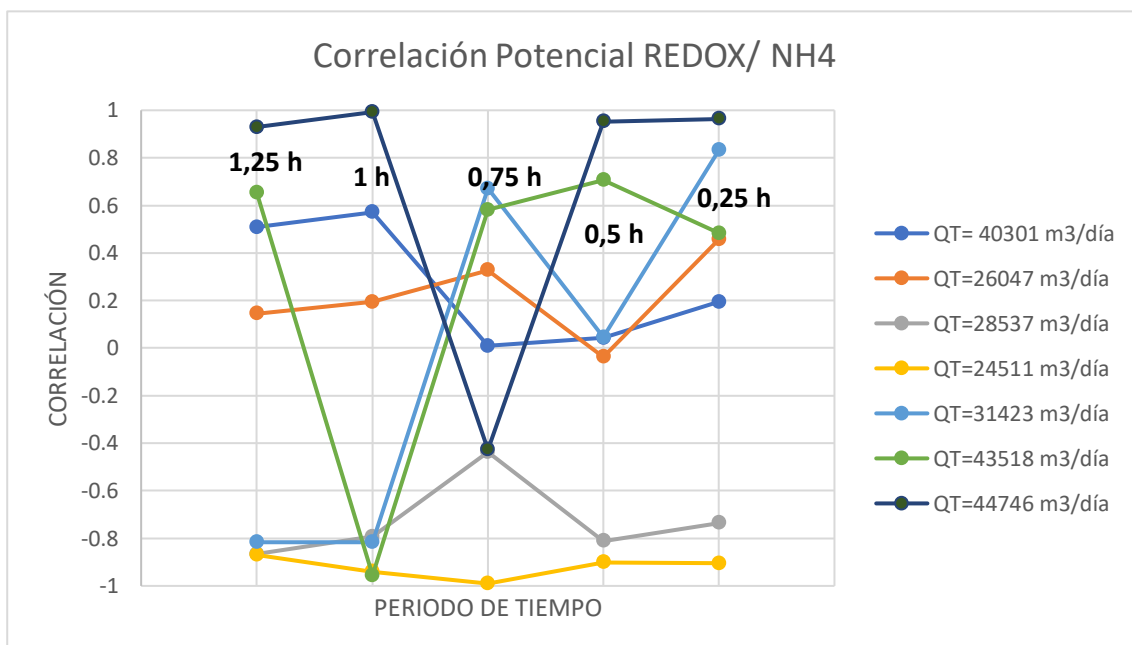


Figura 18. Correlación entre el potencial Redox y el amonio.

De la misma manera que en la Figura 17, las altas correlaciones entre el potencial REDOX y el parámetro se da cuando el caudal es bajo y alto.

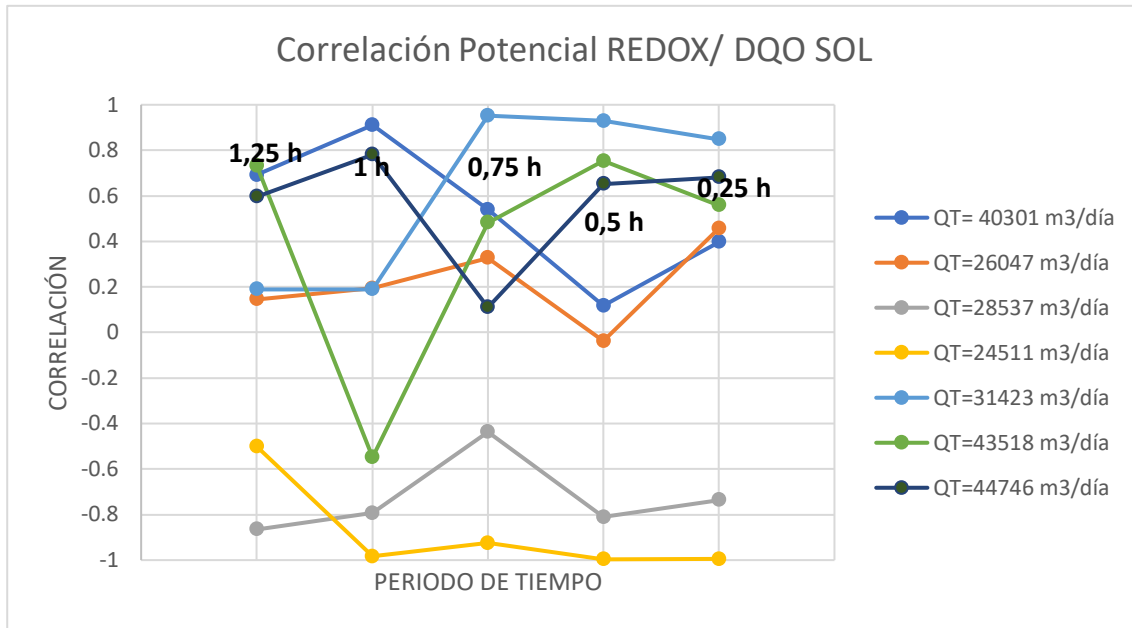


Figura 19. Correlación entre el potencial Redox y la DQO soluble.

En la Figura 19 se vuelve a observar lo mismo que se ha comentado anteriormente. De manera general, se observa que el periodo en el que más altas son las correlaciones es en el de 0,25 h.

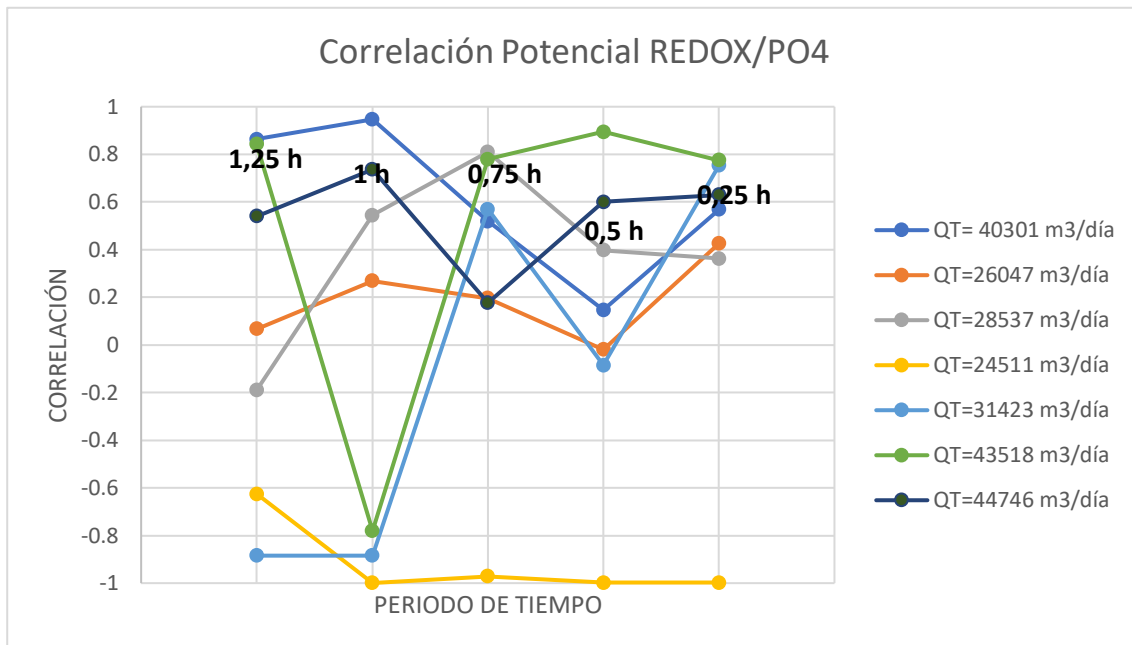


Figura 20. Correlación entre el potencial Redox y los ortofosfatos.

En esta figura se sigue comprobando lo mencionado en las anteriores, con caudales bajos y altos las correlaciones son buenas. Sin embargo, cuando nos encontramos con caudales intermedios las correlaciones bajan.

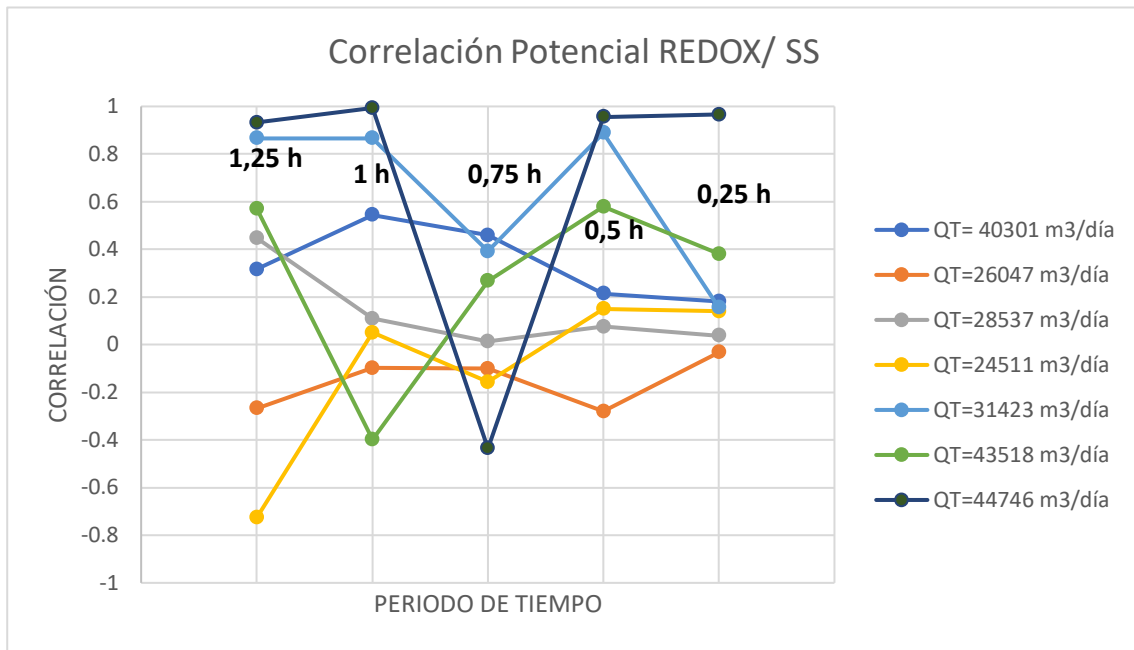


Figura 21. Correlación entre el potencial Redox y los sólidos suspendidos.

Respecto a las otras figuras comentadas anteriormente, en esta se ilustra que cuando el caudal de entrada a la EDAR es bajo, el potencial REDOX y los sólidos suspendidos no se encuentran relacionados. Por lo tanto, cuando el caudal de entrada es bajo no se puede obtener directamente la concentración de sólidos suspendidos.

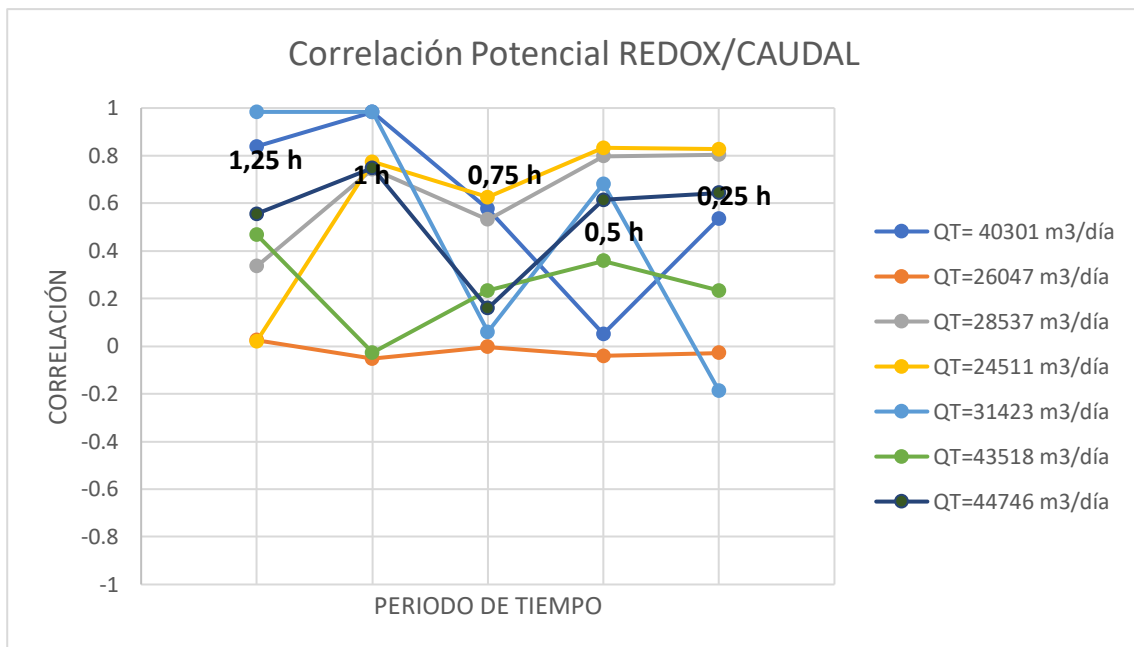


Figura 22. Correlación entre el potencial Redox y el caudal.

De la figura 22 se puede destacar que todas las correlaciones son positivas. Esto indica que un aumento de caudal conlleva un aumento del potencial REDOX.

Tras haber analizado las correlaciones existentes entre el incremento del potencial de reducción-oxidación del agua durante un periodo de tiempo determinado y los diferentes parámetros se puede determinar que a caudales bajos ($Q=24510,98 \text{ m}^3/\text{día}$) las correlaciones existentes son buenas. A medida que el caudal de entrada sufre un aumento ($Q=26046,85 \text{ m}^3/\text{día}$ y $28536,77 \text{ m}^3/\text{día}$) las correlaciones entre las diferentes variables disminuyen de forma notoria. Sin embargo, llega un punto en que cuando el caudal ($Q= 43517,76 \text{ m}^3/\text{día}$ y $44746,68 \text{ m}^3/\text{día}$) es alto, las variables vuelven a tener una buena correlación.

Con estas correlaciones se ha estudiado de manera precisa el comportamiento de los parámetros respecto al valor del potencial REDOX. Con ello, se pretende encontrar la fórmula que relacione la DQO con el potencial REDOX. Se va a buscar esta fórmula ya que la sonda que mide la concentración de DQO tiene un OPEX (coste de operación) y un CAPEX (coste de la sonda) muy elevados respecto a la sonda REDOX.

Además, se ha estudiado la correlación existente entre los diferentes parámetros y el caudal para ver la influencia de las variaciones de este sobre las variables. En primer lugar, se han analizado los datos de todos los días en conjunto:

Tabla 7. Correlación entre el caudal y los parámetros de manera global.

CAUDAL-DQO	-0,3131
CAUDAL-DQO SOL	-0,3963
CAUDAL-NH4	-0,502
CAUDAL-SS	-0,3349
CAUDAL-PO4	-0,3811
CAUDAL-REDOX	0,3176

Cabe destacar, que a excepción del potencial redox, los demás parámetros son inversamente proporcionales al caudal entrante a la EDAR. De la misma manera que sucedía en el análisis de las correlaciones anteriores, el estudio de estas durante todos los días en conjunto lleva consigo correlaciones que no son buenas. Por ello, se ha estudiado la correlación entre el caudal y las diferentes variables por días separados:

27 de mayo ($Q_T=40301 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 8. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 27 de mayo.

CAUDAL-DQO	0,8412
CAUDAL-DQO SOL	0,9415
CAUDAL- NH4	0,6354
CAUDAL-SS	-0,5546
CAUDAL-PO4	0,9601
CAUDAL-REDOX	-0,8064

Se observa que las correlaciones obtenidas son buenas. La mayor correlación existe entre el caudal y los ortofosfatos. La menor existe entre los sólidos suspendidos y el caudal. Cabe recalcar que las relaciones entre la DQO, DQO soluble, amonio, ortofosfatos y el caudal ha pasado a ser directamente proporcional.

28 de mayo ($Q_T=26047 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 9. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 28 de mayo.

CAUDAL-DQO	0,8533
CAUDAL-DQO SOL	0,5832
CAUDAL- NH4	0,6608
CAUDAL-SS	0,4118
CAUDAL-PO4	0,5592
CAUDAL-REDOX	-0,6531

Se puede determinar que la mayor correlación existe entre la DQO y el caudal y la menor entre los sólidos suspendidos y el caudal. Al igual que en el día anterior la mayoría de las relaciones son directamente proporcionales. A pesar de que el caudal varía de forma notoria respecto al día anterior, las correlaciones son buenas.

29 de mayo ($Q_T=28537 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 10. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 29 de mayo.

CAUDAL-DQO	0,4105
CAUDAL-DQO SOL	-0,4235
CAUDAL- NH4	0,3791
CAUDAL-SS	-0,5286
CAUDAL-PO4	0,2309
CAUDAL-REDOX	-0,0027

El 29 de mayo existe un aumento de caudal que lleva consigo una disminución de la relación entre los diferentes parámetros. Al contrario que anteriormente, algunas correlaciones ya no son directamente proporcionales al caudal.

30 de mayo ($Q_T=24511\text{m}^3/\text{día}$)

Tabla 11. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 30 de mayo.

CAUDAL-DQO	-0,6389
CAUDAL-DQO SOL	-0,8759
CAUDAL- NH4	-0,5113
CAUDAL-SS	0,6714
CAUDAL-PO4	-0,7935
CAUDAL-REDOX	0,6649

Con la disminución de caudal hasta el valor mínimo durante las dos semanas de duración de los ensayos se puede ver que las correlaciones mejoran respecto al día anterior. Se observa que por el momento las correlaciones siguen el mismo patrón que las calculadas anteriormente entre el incremento de potencial de reducción-oxidación del agua y las diferentes variables.

31 de mayo ($Q_T=31423\text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 12. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 31 de mayo.

CAUDAL-DQO	-0,3923
CAUDAL-DQO SOL	0,3618
CAUDAL- NH4	-0,6997
CAUDAL-SS	0,9416
CAUDAL-PO4	-0,7868
CAUDAL-REDOX	0,8557

Se observa que la menor relación se encuentra entre el caudal y la DQO soluble, mientras que, la mayor entre los sólidos suspendidos y el caudal. En la mayoría de las correlaciones analizadas respecto al caudal y los parámetros, los sólidos suspendidos tienen buena correlación como se puede comprobar en este día.

3 de junio ($Q_T=43518 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 13. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 3 de junio.

CAUDAL-DQO	0,1372
CAUDAL-DQO SOL	0,2323
CAUDAL- NH4	-0,126
CAUDAL-SS	0,6104
CAUDAL-PO4	-0,0122
CAUDAL-REDOX	0,4698

A pesar de recibir la EDAR un caudal de agua residual considerable, las correlaciones entre los diferentes parámetros no son buenas. Pueden existir diversos factores que expliquen esta diferencia con lo analizado anteriormente. Una de ellas puede ser un vertido muy contaminante que no afecte demasiado en el valor del caudal, pero sí en los diferentes indicadores de calidad del agua residual.

5 de junio ($Q_T=44747\text{m}^3/\text{día}$)

Tabla 14. Correlación entre el caudal y los parámetros en el 5 de junio.

CAUDAL-DQO	0,9938
CAUDAL-DQO SOL	0,9987
CAUDAL- NH4	0,8242
CAUDAL-SS	0,8188
CAUDAL-PO4	0,9998
CAUDAL-REDOX	-0,8515

Con el caudal más alto recibido durante las dos semanas de estudio, se observa que las correlaciones son las mejores obtenidas hasta el momento. Además, todas las variables son directamente proporcionales al caudal a excepción del redox.

Por lo que respecta a la correlación del caudal con las variables sucede lo mismo que lo comentado anteriormente, cuando el caudal de entrada es bajo, la correlación es alta. A medida que el caudal aumenta la correlación es baja hasta que llega un punto en que la correlación vuelve a ser alta cuando el caudal es alto. Sin embargo, cabe destacar que el día 3 de junio el caudal es alto pero la correlación es baja probablemente debido a un vertido muy contaminante

Además, se puede determinar que los sólidos suspendidos tienen poca correlación con el potencial redox del agua. Sin embargo, con el caudal ocurre todo lo contrario.

6.2. Resultados obtenidos para el fango primario

Tras analizar los datos obtenidos sobre el agua decantada se va a estudiar la composición de los fangos primarios de los tres decantadores, así como, su carga contaminante en el rebose de los mismos. Los valores de los parámetros para cada decantador son iguales durante el mismo día ya que la muestra se ha recogido de manera puntual y no de forma periódica como los fangos primarios.

Se ha dispuesto de un total de 75 muestras analizadas de fango y 75 juegos de datos tras dos semanas de estudio. En azul se encuentran marcados los valores que son representativos.

En primer lugar, se muestran los datos del decantador primario nº1:

Tabla 15. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº1

FECHA	Hora	% MS	% MV	DQO	DQO sol	PO ₄	NH ₄	SS
27/5/24	10:41	6,54	76,12	341	173	2,01	33,4	82
27/5/24	10:46	0,2	49,3	341	173	2,01	33,4	82
27/5/24	10:51	0,13	31,75	341	173	2,01	33,4	82
27/5/24	10:56	0,13	32,14	341	173	2,01	33,4	82
27/5/24	11:01	0,13	33,73	341	173	2,01	33,4	82
29/5/24	11:15	5,13	74,98	332	173	6,08	37,2	134
29/5/24	11:20	1,45	71,18	332	173	6,08	37,2	134
29/5/24	11:25	0,15	37,31	332	173	6,08	37,2	134
29/5/24	11:30	0,3	46,56	332	173	6,08	37,2	134
29/5/24	11:35	0,43	55,5	332	173	6,08	37,2	134
31/5/24	10:15	7,05	76,15	566	340	12	82,6	121
31/5/24	10:20	0,33	46,28	566	340	12	82,6	121
31/5/24	10:25	0,23	31,49	566	340	12	82,6	121
31/5/24	10:30	0,24	29,36	566	340	12	82,6	121
31/5/24	10:35	0,22	12,06	566	340	12	82,6	121
3/6/24	11:53	8,73	71,35	346	228	5,4	52,2	54
3/6/24	11:58	0,33	51,36	346	228	5,4	52,2	54
3/6/24	12:03	0,13	32,92	346	228	5,4	52,2	54
3/6/24	12:08	0,13	28,37	346	228	5,4	52,2	54
3/6/24	12:13	0,12	25,14	346	228	5,4	52,2	54
5/6/24	10:53	5,13	72,33	294	170	4,04	35,7	86
5/6/24	10:58	0,2	47,44	294	170	4,04	35,7	86
5/6/24	11:03	0,16	39,07	294	170	4,04	35,7	86
5/6/24	11:08	0,15	40	294	170	4,04	35,7	86
5/6/24	11:13	0,14	40,96	294	170	4,04	35,7	86

Cabe destacar que las muestras que tienen un porcentaje de materia seca menor al 1% no son representativas debido al error de la balanza y al volumen estudiado por lo que dan valores de materia volátil aleatorios.

Como se ha explicado antes, el porcentaje de materia volátil hace referencia a la cantidad de materia orgánica presente en una muestra. Si se observa los valores de materia volátil se puede determinar que, independientemente de la carga contaminante de DQO, los porcentajes son similares. Esto indica que independientemente de la carga que entre al decantador, si se mantiene el tiempo de purga, la carga contaminante que recoge en los fangos primarios es la misma.

A continuación, se muestran los datos del decantador nº3:

Tabla 16. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº3

FECHA	Hora	% MS	% MV	DQO	DQO sol	PO ₄	NH ₄	SS
27/5/24	10:05	0,3	54,32	299	110	1,77	30,4	54
27/5/24	10:10	0,15	45,11	299	110	1,77	30,4	54
27/5/24	10:15	2,4	76,34	299	110	1,77	30,4	54
27/5/24	10:20	0,11	38,06	299	110	1,77	30,4	54
27/5/24	10:23	0,14	28,87	299	110	1,77	30,4	54
29/5/24	10:39	2,6	73,72	313	175	5,85	65,4	134
29/5/24	10:44	0,94	68,63	313	175	5,85	65,4	134
29/5/24	10:49	0,28	44,42	313	175	5,85	65,4	134
29/5/24	10:54	0,16	57,6	313	175	5,85	65,4	134
29/5/24	10:57	0,31	67,67	313	175	5,85	65,4	134
31/5/24	11:15	1,03	68,87	580	360	12	82,6	121
31/5/24	11:20	1,66	71,24	580	360	12	82,6	121
31/5/24	11:25	0,25	35,62	580	360	12	82,6	121
31/5/24	11:30	0,23	38,56	580	360	12	82,6	121
31/5/24	11:35	0,2	15,72	580	360	12	82,6	121
3/6/24	11:17	0,14	26,16	327	164	4,7	47,3	48
3/6/24	11:22	2,54	63,75	327	164	4,7	47,3	48
3/6/24	11:27	0,17	35,38	327	164	4,7	47,3	48
3/6/24	11:32	0,14	34,21	327	164	4,7	47,3	48
3/6/24	11:35	0,14	29,66	327	164	4,7	47,3	48
5/6/24	10:16	0,2	47,67	249	153	3,46	41,2	70
5/6/24	10:21	0,25	55,42	249	153	3,46	41,2	70
5/6/24	10:26	0,15	33,76	249	153	3,46	41,2	70
5/6/24	10:31	0,14	35,75	249	153	3,46	41,2	70
5/6/24	10:34	0,16	33,33	249	153	3,46	41,2	70

En este decantador se observa que la muestra recogida a tiempo 0 nunca es representativa. Las principales sospechas son que la tubería de impulsión de fango tiene una bolsa de aire que implica que los primeros minutos de purga esta no sea efectiva.

Se observa que el decantador nº3 sigue la misma línea que el decantador nº1. Independientemente de la carga orgánica, el decantador obtiene unos porcentajes de materia volátil similares.

Por último, se muestran los datos del decantador nº4:

Tabla 17. Parámetros del fango y parámetros del rebose del decantador nº4

FECHA	Hora	% MS	% MV	DQO	DQO sol	PO ₄	NH ₄	SS
27/5/24	10:23	0,3	54,32	234	111	1,83	30,6	58
27/5/24	10:28	0,15	45,11	234	111	1,83	30,6	58
27/5/24	10:33	2,4	76,34	234	111	1,83	30,6	58
27/5/24	10:38	0,11	38,06	234	111	1,83	30,6	58
27/5/24	10:41	0,14	28,87	234	111	1,83	30,6	58
29/5/24	10:57	2,6	73,72	334	174	6,06	57,7	132
29/5/24	11:02	0,94	68,63	334	174	6,06	57,7	132
29/5/24	11:07	0,28	44,42	334	174	6,06	57,7	132
29/5/24	11:12	0,16	57,6	334	174	6,06	57,7	132
29/5/24	11:15	0,31	67,67	334	174	6,06	57,7	132
31/5/24	9:57	1,03	68,87	612	349	11,3	84,6	126
31/5/24	10:02	1,66	71,24	612	349	11,3	84,6	126
31/5/24	10:07	0,25	35,62	612	349	11,3	84,6	126
31/5/24	10:12	0,23	38,56	612	349	11,3	84,6	126
31/5/24	10:15	0,2	15,72	612	349	11,3	84,6	126
3/6/24	11:17	0,14	26,16	342	192	5,9	54,8	80
3/6/24	11:22	2,54	63,75	342	192	5,9	54,8	80
3/6/24	11:27	0,17	35,38	342	192	5,9	54,8	80
3/6/24	11:32	0,14	34,21	342	192	5,9	54,8	80
3/6/24	11:35	0,14	29,66	342	192	5,9	54,8	80
5/6/24	10:34	0,2	47,67	252	149	3,5	33,1	58
5/6/24	10:39	0,25	55,42	252	149	3,5	33,1	58
5/6/24	10:44	0,15	33,76	252	149	3,5	33,1	58
5/6/24	10:49	0,14	35,75	252	149	3,5	33,1	58
5/6/24	10:53	0,16	33,33	252	149	3,5	33,1	58

De la misma forma que ocurría en los otros dos decantadores, el porcentaje de materia volátil es similar en las muestras representativas.

Si se observa de manera general el resto de los parámetros, se puede determinar que el día 31 de mayo hubo un gran vertido de amonio y fósforo a la EDAR ya que la concentración es muy superior a la de otros días.

6.3. Representaciones gráficas de interés

En la Figura 23 se realiza una representación gráfica, en ella se observa cómo evoluciona el amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), la DQO total, la DQO soluble y los sólidos suspendidos y el potencial de reducción-oxidación, durante los días que se tomaron muestras:

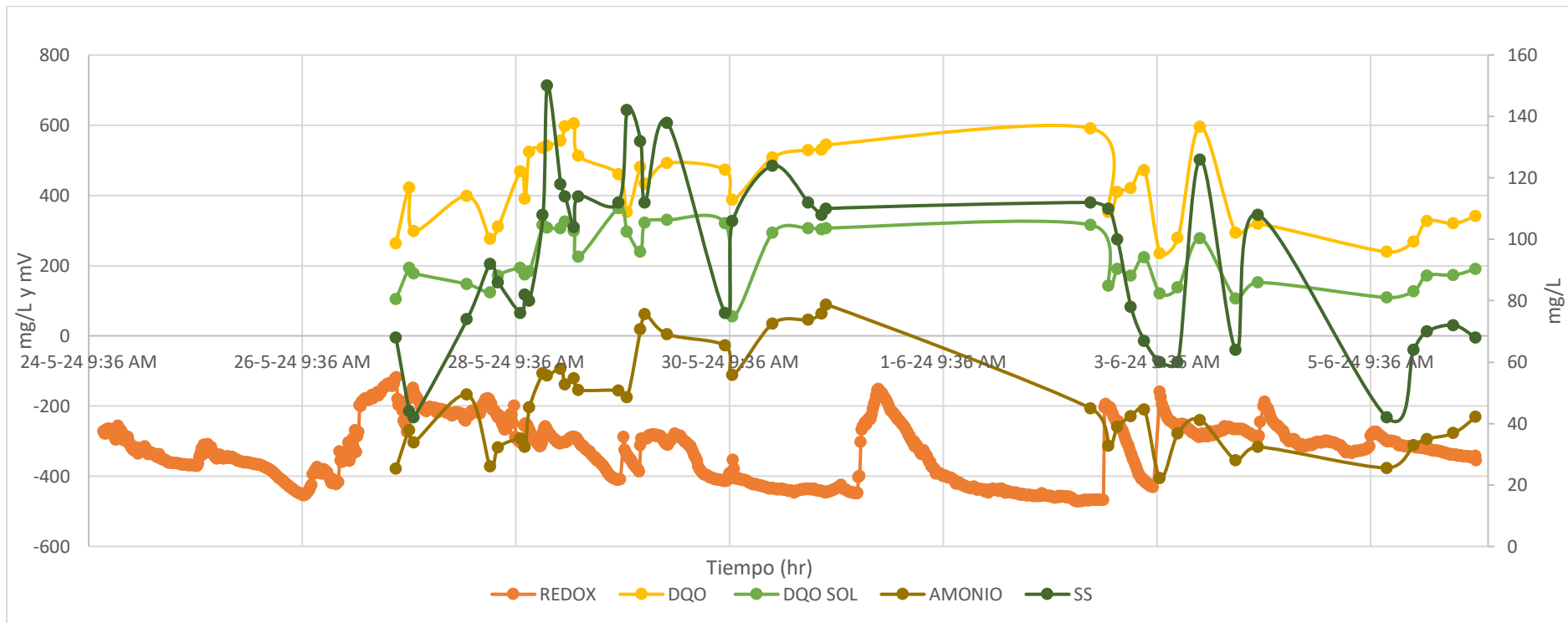


Figura 23. DQO total, DQO soluble, amonio, sólidos suspendidos y potencial redox frente a tiempo.

En la Figura 23 se observa lo siguiente:

- Respecto a la DQO y la DQO soluble se diferencia que cuando el potencial redox muestra picos negativos, es decir, condiciones más reductoras, estos dos parámetros tienden a mostrar aumentos en sus valores. Se corrobora que cuanto menor potencial redox negativo, mayor es la concentración de materia orgánica en el agua residual. Las variaciones en la concentración de amonio también están relacionadas con los cambios en el potencial redox. En condiciones reductoras, la concentración de amonio puede aumentar debido a la descomposición de materia orgánica en condiciones anaerobias. Por último, los cambios del potencial redox no comportan variaciones en la concentración de los sólidos suspendidos. Por tanto, se afirma lo analizado anteriormente con el cálculo de las correlaciones, los sólidos suspendidos son el parámetro que menor relación tiene con el potencial de reducción-oxidación.

Seguidamente, en la Figura 24, se muestra la evolución del potencial de reducción-oxidación y la de los ortofosfatos. Se ha realizado en otra representación gráfica ya que la concentración de ortofosfatos no se apreciaba correctamente en el gráfico anterior.

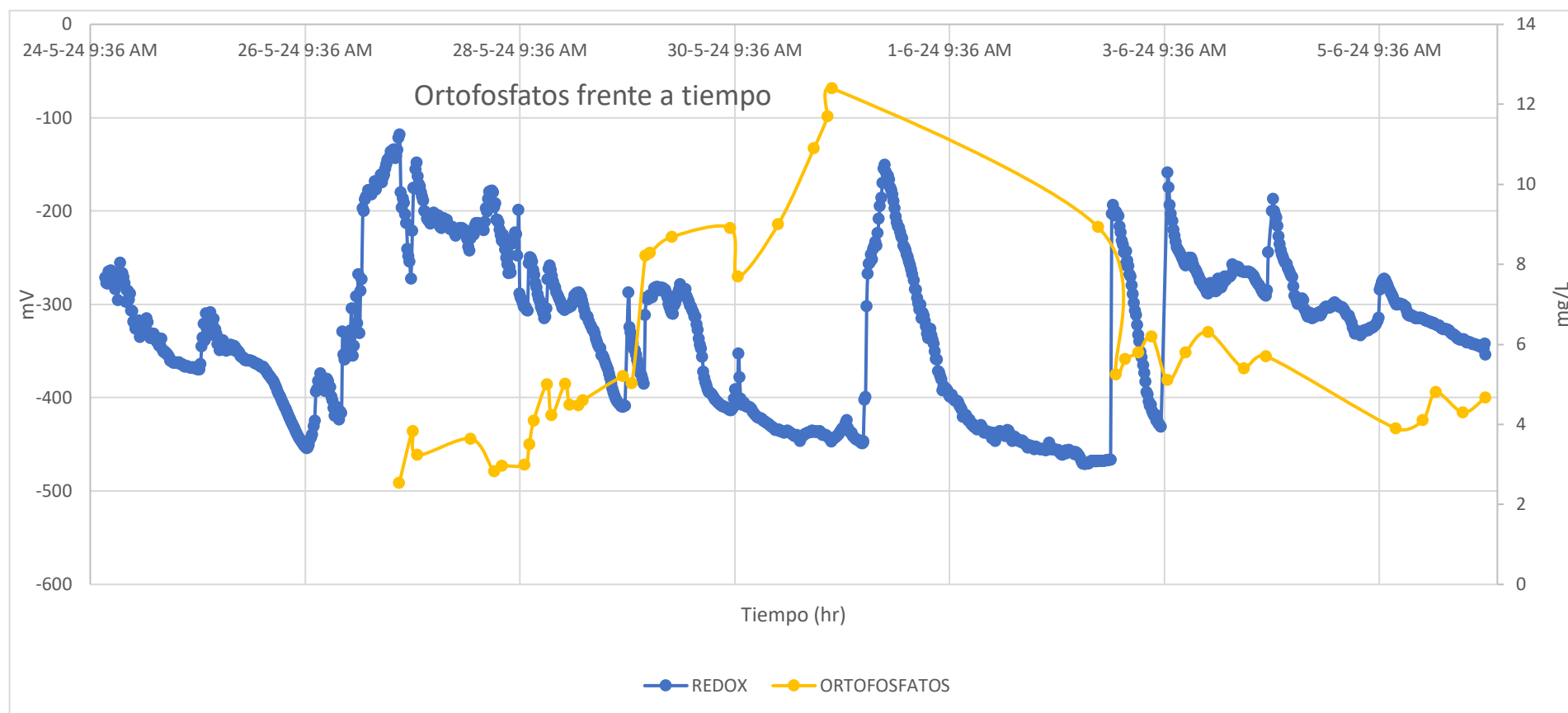


Figura 24. Ortofosfatos y potencial redox frente a tiempo.

La Figura 24 muestra lo siguiente:

- Cuando el redox se encuentra por debajo de -300 mV, se observan picos en la concentración de ortofosfatos. Esto puede ser debido a que en condiciones reductoras los ortofosfatos sean liberados al medio.
- Cuando el potencial de reducción aumenta y se hace menos negativo, la concentración de ortofosfatos se reduce por lo general. En condiciones de potencial redox menos reductoras, los ortofosfatos tienden a precipitar.

En la Figura 23 y 24, se observa la relación que existe entre los diferentes parámetros analizados y el potencial redox. A simple vista, se puede determinar que los ortofosfatos y el amonio son los parámetros con mayor relación con el potencial de reducción-oxidación. Como era de esperar, un potencial menor indica una mayor contaminación del agua. Cabe destacar que el parámetro que menor relación tiene con el potencial redox son los sólidos suspendidos. Los gráficos concuerdan con las correlaciones obtenidas anteriormente.

En la Figura 25, se encuentran representadas las correlaciones existentes entre los diferentes parámetros analizados.

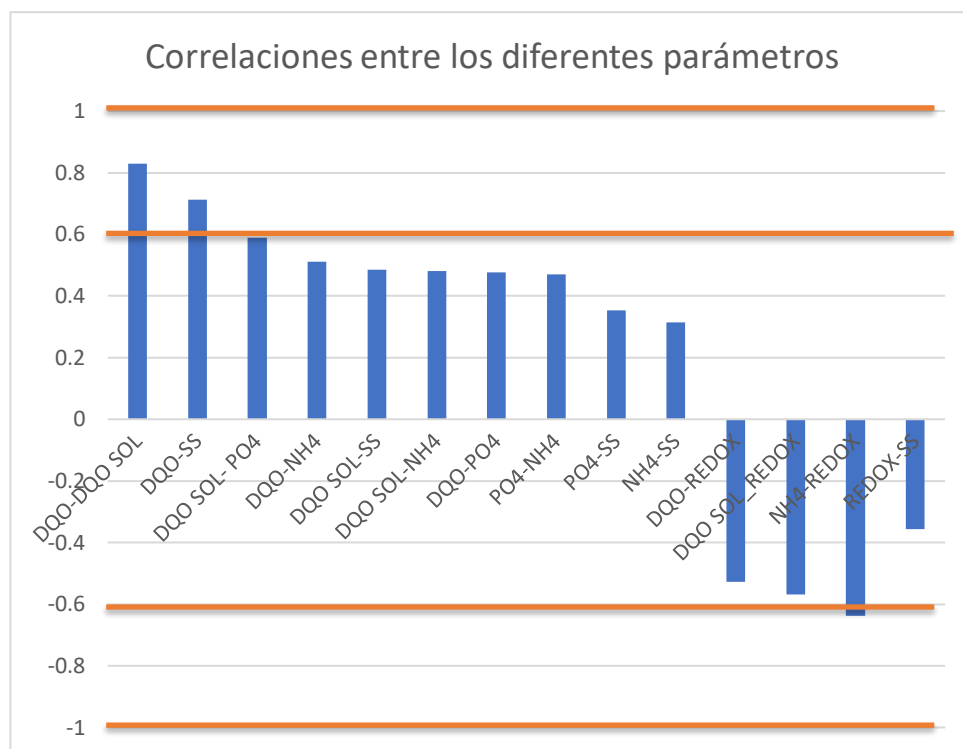


Figura 25. Correlaciones entre los diferentes parámetros.

La Figura 25 muestra como las mejores correlaciones se dan entre la DQO y la DQO soluble, entre la DQO y los sólidos suspendidos y entre el amonio y el redox. Entre los marcadores naranjas están marcadas las correlaciones que se consideran buenas. Cabe

destacar que la peor correlación se da entre el amonio y los sólidos suspendidos ya que el amonio es una forma soluble.

Tras haber analizado muestras de agua durante dos semanas se va a calcular la fórmula que relaciona los parámetros entre ellos.

A continuación, se muestran los gráficos de dispersión entre los parámetros que se ha considerado que tienen buena correlación. A partir de ellos, se va a calcular la fórmula que relaciona los diferentes parámetros.

En primer lugar, se muestra en la Figura 26 el gráfico de dispersión entre la DQO y la DQO soluble:

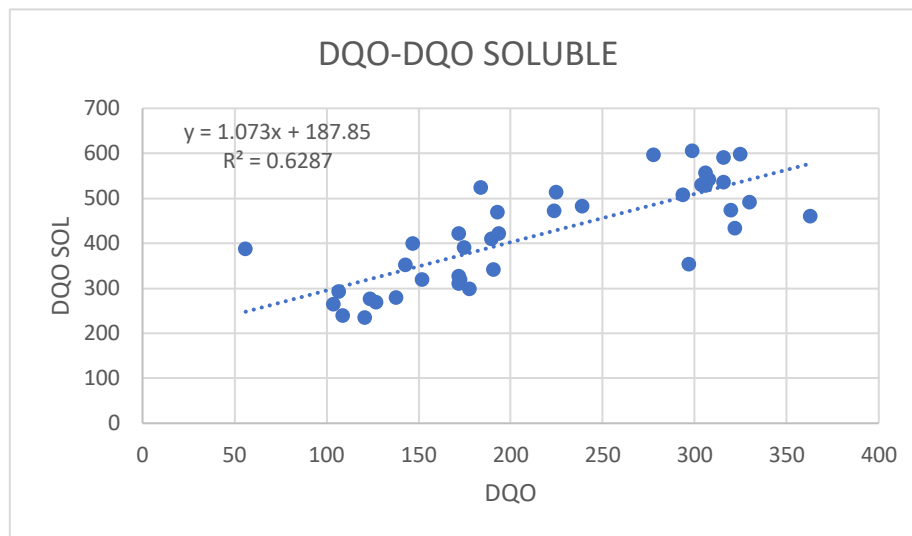


Figura 26. Gráfico de dispersión entre la DQO y DQO soluble.

Por lo tanto, la fórmula que relaciona la DQO soluble con la DQO es:

$$DQO \text{ soluble} = 1,073 \cdot DQO + 187,85$$

Ecuación 14. Fórmula de la DQO soluble respecto a la DQO.

Se ha hecho uso de una línea de tendencia lineal ya que tiene mayor correlación.

En segundo lugar, se representa en la Figura 27, el gráfico de dispersión entre la DQO y los sólidos suspendidos:

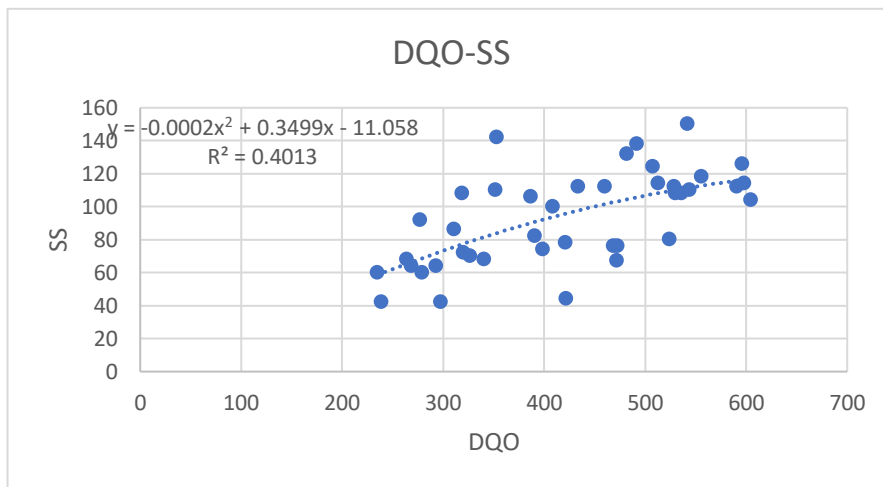


Figura 27. Gráfico de dispersión entre la DQO y los sólidos suspendidos.

Por ello, la fórmula que relaciona la DQO con los sólidos suspendidos es:

$$SS = -0,0002 \cdot DQO^2 + 0,3499 \cdot DQO - 11,058$$

Ecuación 15. Fórmula de los sólidos suspendidos respecto a la DQO.

Se ha hecho uso de una línea de tendencia logarítmica ya que tiene mayor correlación.

En tercer lugar, se representa en la Figura 28, el gráfico de dispersión entre el potencial de reducción-oxidación y el amonio:

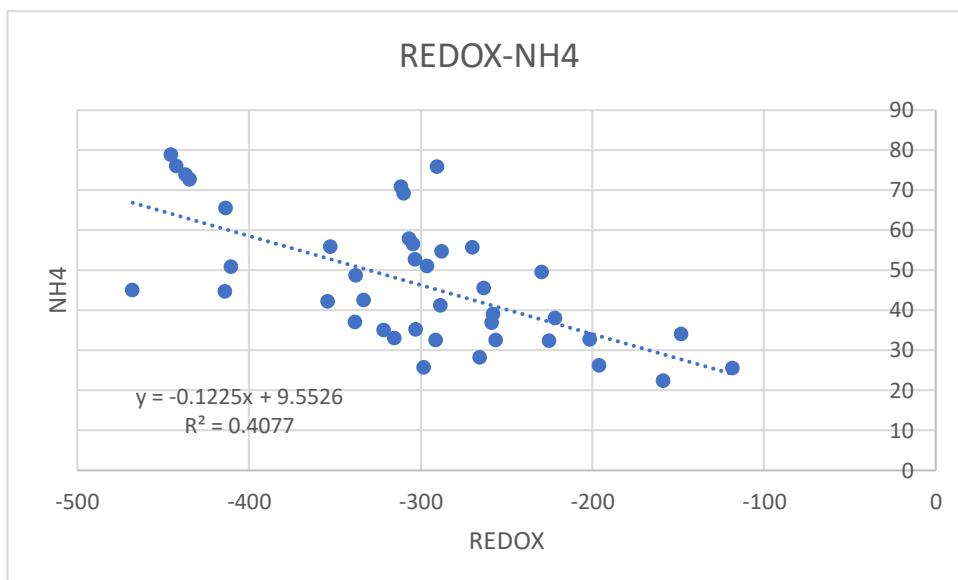


Figura 28. Gráfico de dispersión entre el potencial redox y el amonio.

La fórmula que relaciona el amonio con el potencial redox es:

$$NH_4 = -0,1125 \cdot Redox + 9,5526$$

Ecuación 16. Fórmula del amonio respecto al potencial de reducción-oxidación.

Por último, se representa en la Figura 29, el gráfico de dispersión REDOX-DQO para obtener la fórmula que relaciona ambos parámetros.

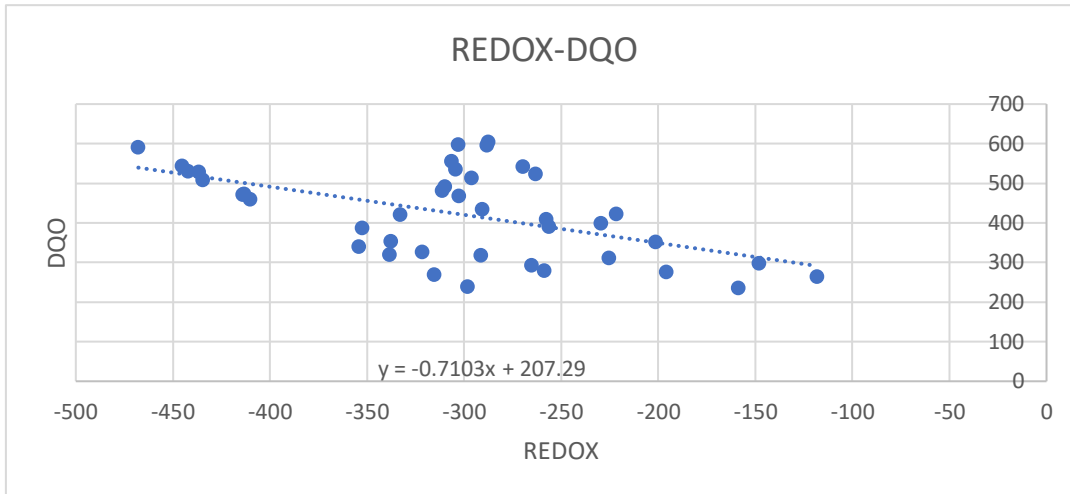


Figura 29. Gráfico de dispersión entre el potencial redox y la DQO.

La fórmula que relaciona la DQO con el potencial redox es:

$$DQO = -0,7103 \cdot Redox + 207,29$$

Ecuación 17. Fórmula de la DQO respecto al potencial de reducción-oxidación.

Tras haber obtenido diferentes fórmulas, ya se tiene a los parámetros de gran correlación relacionados de manera empírica. A partir de la medición del potencial redox ya se puede obtener la concentración de diferentes parámetros aproximadamente.

A continuación, se va a realizar la representación gráfica de todas las correlaciones obtenidas.

En primer lugar, se representan las correlaciones entre el caudal y los diferentes parámetros (Figura 30):

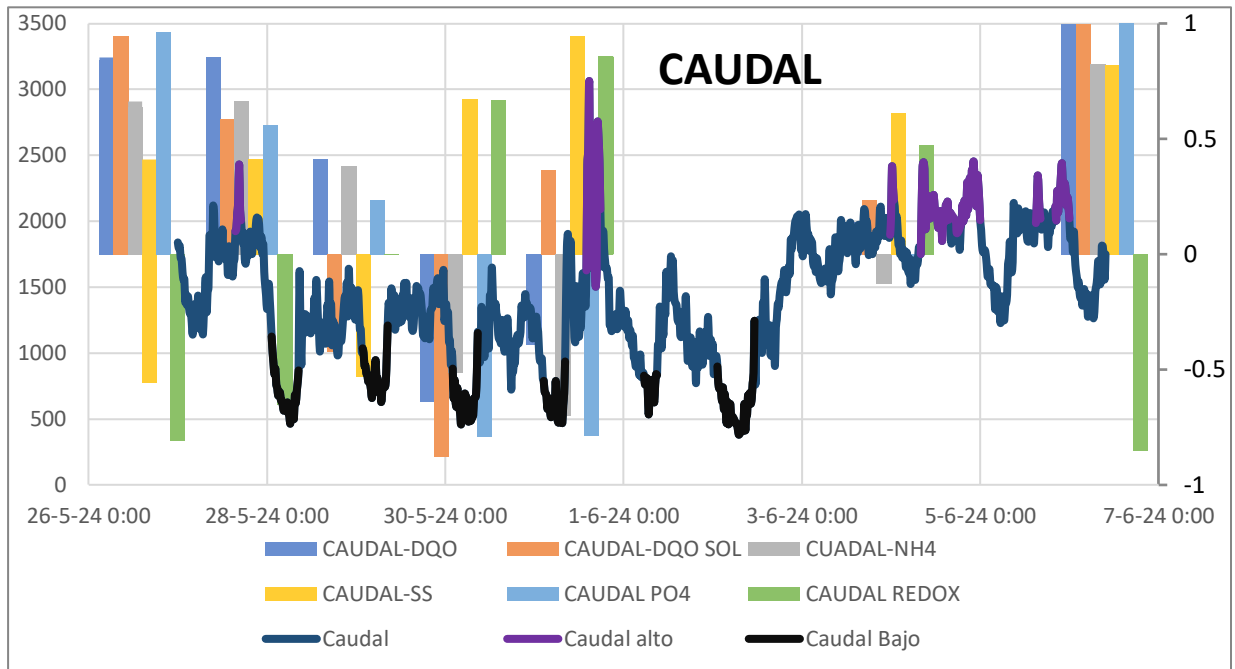


Figura 30. Correlaciones entre el caudal y los parámetros

En esta gráfica se representa la relación entre el caudal y las diferentes pendientes analizadas. Se observa que las altas correlaciones se dan en dos casos diferentes, cuando el caudal de entrada a la EDAR es elevado y cuando el caudal es bajo.

En la Figura 31, se representa las correlaciones de la DQO respecto al incremento de potencial redox durante un periodo de tiempo:

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

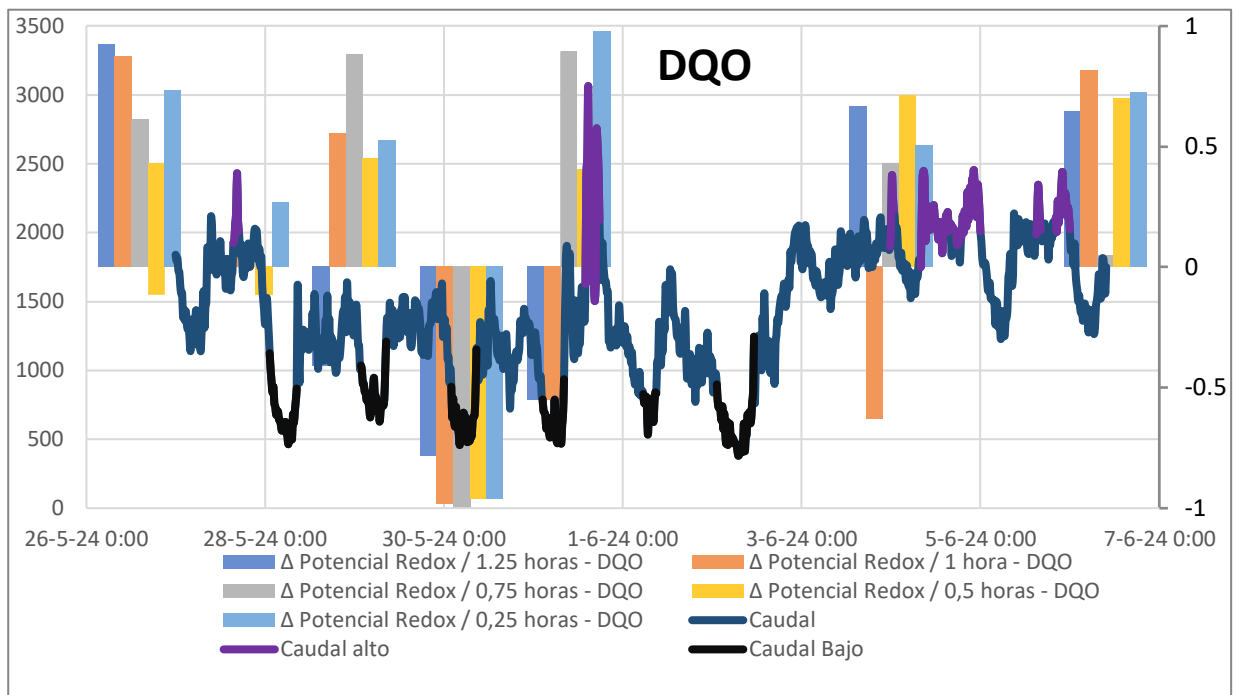


Figura 31. DQO y correlaciones.

En esta gráfica se observa la relación existente entre la DQO y las pendientes analizadas. De la misma manera que sucedía en la Figura 30, las correlaciones son altas se obtienen a caudales bajos y altos. El punto álgido de estas correlaciones se da el día 30 de mayo.

A continuación, en la Figura 32 se muestra las correlaciones de la DQO soluble frente al incremento de potencial redox durante un periodo de tiempo:

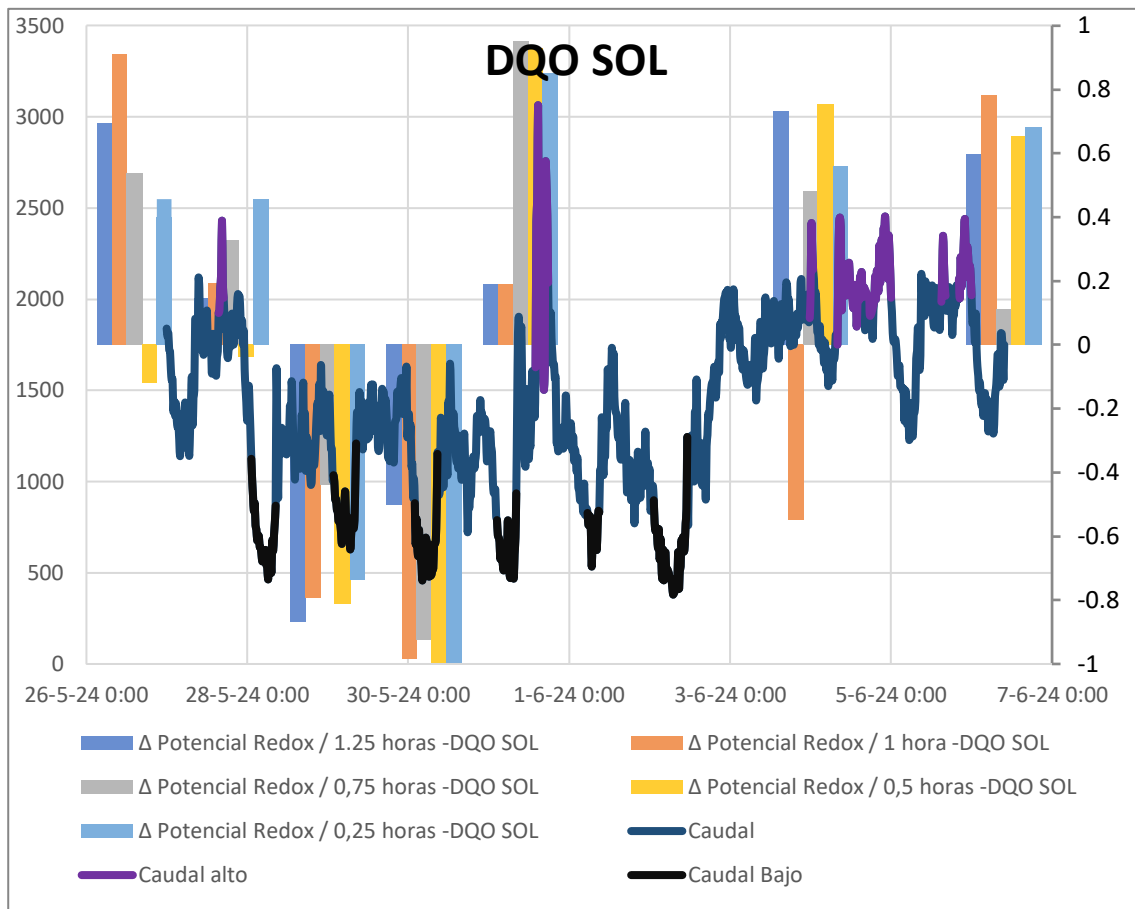


Figura 32. DQO soluble y correlaciones.

Observando la representación gráfica se sigue comprobando lo comentado anteriormente, las altas correlaciones se dan cuando los caudales son altos y bajos. Se observa que la menor correlación se da el día 3 de junio mientras que la mayor el 30 de mayo.

En la Figura 33 se muestran las correlaciones del amonio:

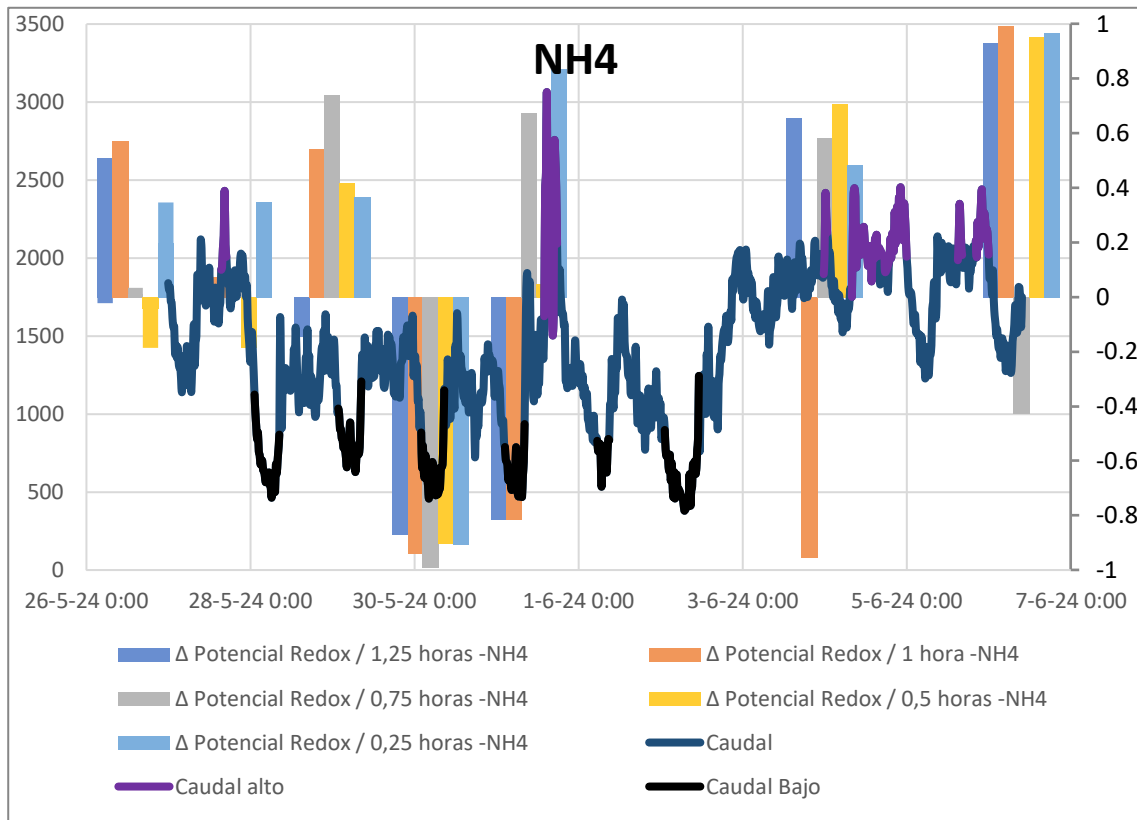


Figura 33. Amonio y correlaciones

Respecto al amonio, por una parte, se puede concluir que su mayor correlación con las pendientes se da tanto el día 30 de mayo como el día 6 de junio. Por otra parte, se observa que la menor correlación del amonio se da el día 28 de mayo.

Seguidamente, se representan las correlaciones entre el incremento de potencial redox durante un periodo de tiempo y los sólidos suspendidos (Figura 34):

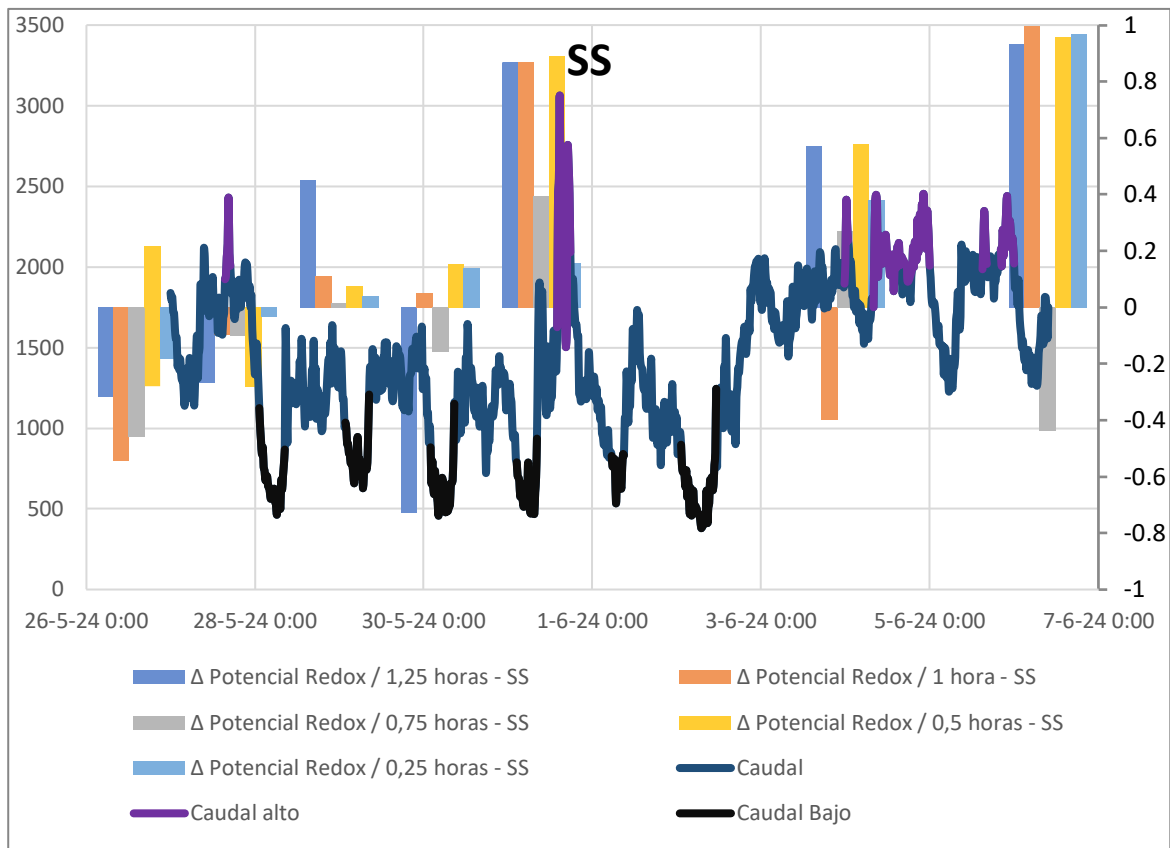


Figura 34. Sólidos suspendidos y correlaciones.

Tras comparar las diferentes gráficas (Figuras 30, 31, 32, 33y 34), se puede determinar que los sólidos suspendidos es el parámetro que menor correlación tiene con las pendientes de redox. Sin embargo, se observa que los días 31 de mayo y 6 de junio tiene buenas correlaciones.

Las correlaciones entre los ortofosfatos y los diferentes incrementos de potencial se representan en la Figura 29.

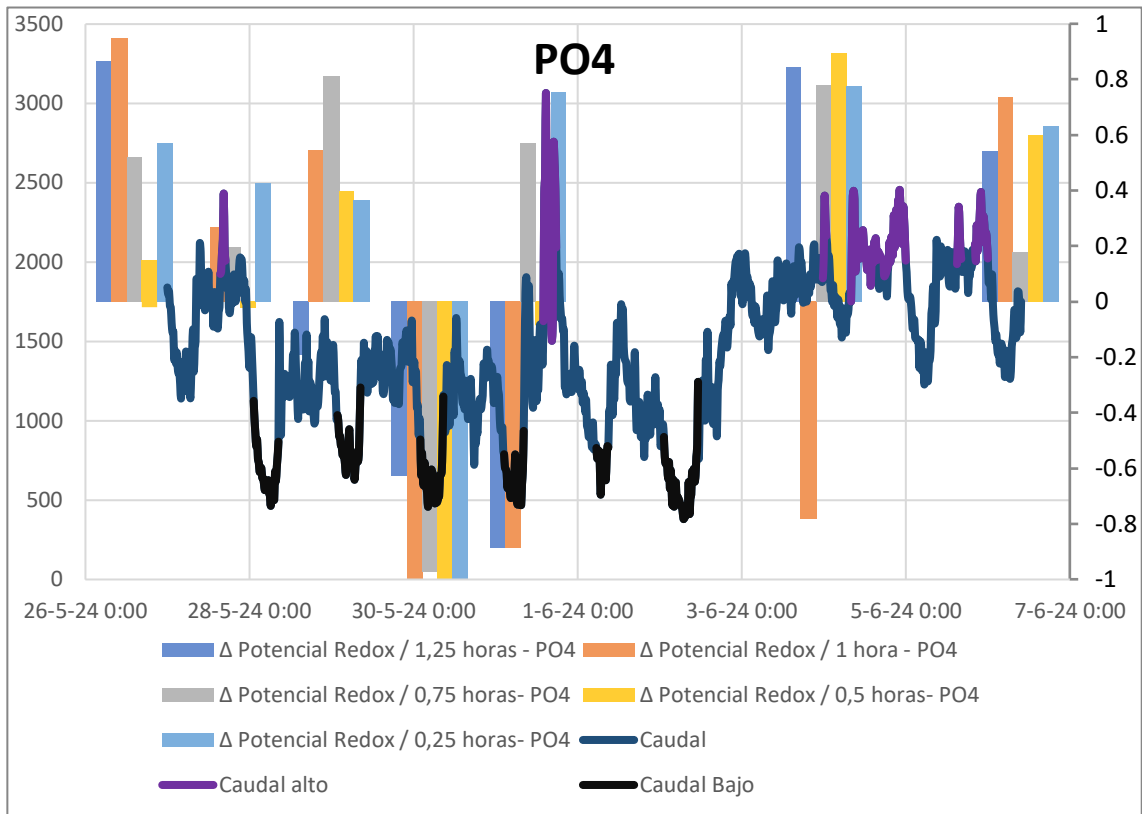


Figura 35. Ortofosfatos y correlaciones.

Haciendo referencia a los ortofosfatos, se puede concretar que las correlaciones altas se dan el día 30 de mayo y 3 de junio. Además, se puede comprobar que como sucede en todas las representaciones anteriores, cuando se dan caudales altos y bajos es cuando mayor correlación existe.

En la siguiente Figura 36, se representan las correlaciones del potencial redox del agua frente al incremento del mismo:

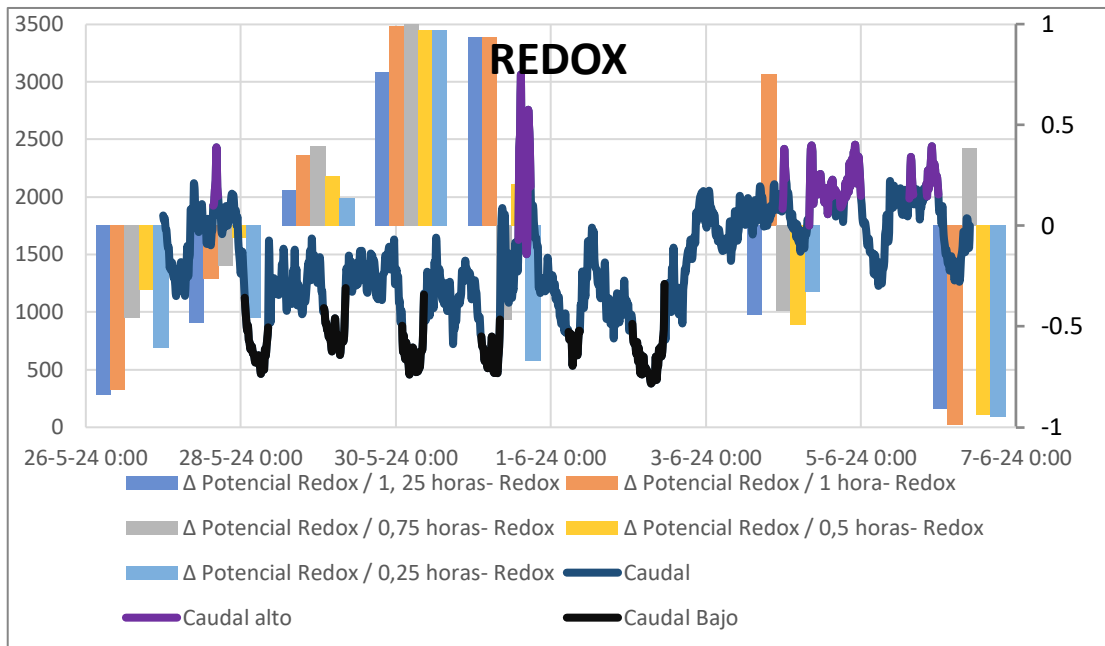


Figura 36. Redox y correlaciones.

Como era de esperar las correlaciones que obtiene el potencial de reducción-oxidación del agua son altas ya que se está comparando los valores del redox frente a incrementos del mismo.

Por último, se representan las correlaciones del caudal frente a los diferentes incrementos de potencial redox (Figura 37):

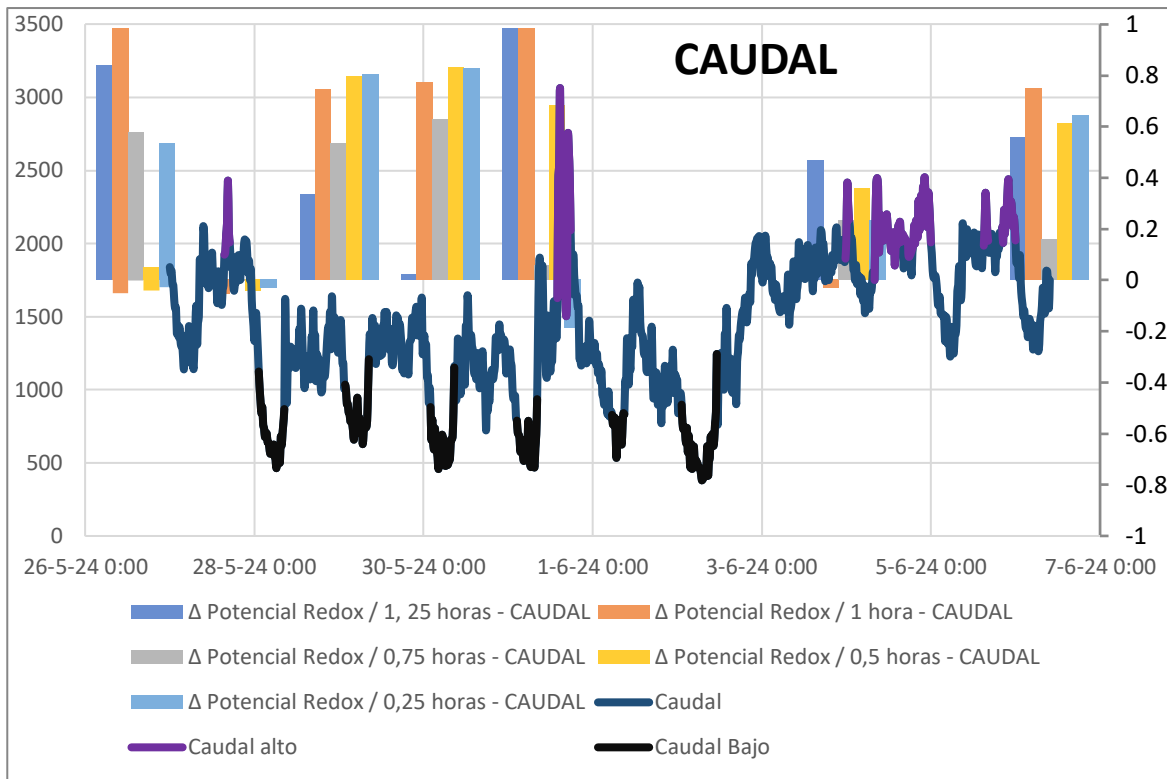


Figura 37. Caudal y correlaciones.

El caudal, junto al redox, son los parámetros que mejores correlaciones presentan. En el caso del caudal estas se dan todos los días en los que se ha realizado el análisis a excepción del 28 de mayo y 3 de junio.

Tras realizar las diferentes representaciones gráficas, se observa que, por norma general, las mejores correlaciones se dan cuando el caudal de entrada a la EDAR es alto o bajo. Ante caudales medios las correlaciones no son lo suficientemente buenas.

7. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha centrado en la optimización del proceso de decantación primaria en una Estación Depuradora de Aguas Residuales de 450.000 habitantes equivalentes. El objetivo principal ha sido la reducción de la Demanda Química de Oxígeno en la línea de aguas incrementando así la producción de biogás. Otros objetivos han sido la caracterización del agua entrante al reactor biológico como la búsqueda de fórmulas que relacionen diferentes parámetros.

Después de analizar las diferentes tablas y representaciones gráficas, se puede concluir que las variables que mayor correlación tienen entre sí son la DQO total y la DQO soluble.

Siendo la DQO total es la suma de la DQO soluble más la DQO particulada. Esto conlleva a una gran correlación entre ellas ya que la DQO total tiene una gran dependencia de la soluble.

Respecto a las variables que menos relación tienen entre ellas son el amonio y los sólidos suspendidos. A pesar de que ambos son indicadores de la calidad del agua, su correlación es baja. Principalmente, es debido a que el amonio es un compuesto químico disuelto en el agua que se forma a partir de la descomposición de la materia orgánica nitrogenada mientras que los sólidos suspendidos son partículas físicas que no se encuentran disueltas. Por lo tanto, las partículas de sólidos están formadas por muy poca cantidad de amonio.

En lo que se refiere al potencial REDOX del agua, los parámetros que mayor correlación tienen con el potencial son el amonio y los ortofosfatos.

En el agua estudiada, el potencial REDOX es negativo debido a que la cantidad presente de oxígeno en el agua es relativamente baja. Además, una alta contaminación influye en la disminución del potencial redox. El principal motivo es que cuanto mayor es la contaminación, mayor materia se debe descomponer. Por lo tanto, la concentración de oxígeno disminuye a la vez que lo hace el potencial de reducción-oxidación del agua.

En relación con los ortofosfatos es debido, principalmente, a la liberación y precipitación de ortofosfatos. En primer lugar, los compuestos de hierro (III) (Fe^{3+}), procedentes de la adición del coagulante previo al decantador, suelen precipitar como fosfatos de hierro capturando ortofosfatos en las partículas sedimentadas, eliminándose por la corriente de fango primario. En segundo lugar, dichos fosfatos se disuelven en el agua liberando ortofosfatos (PO_4^{3-}). Por lo tanto, con potenciales de redox negativos aumenta la concentración de ortofosfatos.

Haciendo referencia al amonio (NH_4), en ambientes reductores la materia orgánica se descompone y una parte se convierte en amonio a través de la amonificación. La

ausencia de oxígeno limita la oxidación del amonio en otras formas de nitrógeno que conlleva en una mayor cantidad de amonio en el agua.

Como se ha observado durante todo el análisis de resultados, se puede determinar que entre determinadas variables existe una gran correlación. Principalmente existe entre la DQO y la DQO soluble y entre los ortofosfatos y amonio con el potencial redox.

Una mayor concentración de estos compuestos químicos lleva consigo mismo una mayor contaminación del agua residual y, por tanto, un potencial de reducción-oxidación menor.

Además, cabe destacar que las altas correlaciones se dan a caudales altos (alrededor de 43000 m³/día) y a caudales bajos (alrededor de 25000 m³/día). La baja correlación a caudal intermedios puede ser debido a que se produzca una combinación de las condiciones de los caudales altos y bajos.

La obtención de los datos ha permitido caracterizar el agua entrante al reactor biológico, así como prever como se va a comportar el agua residual a partir del conocimiento del caudal y de su potencial de reducción-oxidación.

Durante el estudio del agua residual se ha analizado la concentración de amonio, por lo tanto, ha sido necesario relacionarla con la concentración de nitratos para llegar a conocer la concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO) necesaria en el reactor biológico. La relación existente entre la concentración de nitratos NO_3^- y la DQO necesaria en dicho reactor viene determinada por la ecuación estequiométrica 2.

Una vez conocida la DQO necesaria en el reactor, la optimización para el proceso consiste en ajustar las purgas del sistema a la carga de cada momento, intentando que la purga de los fangos primarios sea lo más alta posible siempre que se garantice la DQO necesaria en el reactor. Es decir, conociendo el caudal si se observa una bajada del potencial REDOX del agua, un aumento de la DQO, se puede incrementar esa purga siempre que se garantice la DQO para llevar a cabo la desnitrificación.

Además, esta optimización sirve para ver de manera global los decantadores y ajustar las purgas generales y de manera particular si se observa un aumento de la DQO decantada puede ser que no sean en los cuatro decantadores, sino que uno de ellos funcione mal y se pueda aumentar la purga del mismo

Por lo tanto, con el aumento de la carga orgánica en los fangos se ha conseguido llevar a cabo un aumento del potencial de producción de biogás de estos fangos primarios.

7.1. IMPLICACIONES DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, el aumento de producción de biogás fruto de la reducción de la DQO en la línea de aguas indica que es posible mejorar de manera simultánea la eficiencia energética, así como, el tratamiento del agua residual.

Por una parte, las implicaciones de estas mejoras se pueden extrapolar a otras EDARs además de la EDAR en la que se ha realizado el estudio. Estos resultados destacan la importancia de la innovación y desarrollo tecnológico en el sector del agua. Por otra parte, la metodología empleada para identificar y evaluar las correlaciones entre los diferentes indicadores puede ser adoptada como una herramienta para la optimización del tratamiento de aguas residuales.

7.2. LIMITACIONES

La principal limitación que se ha encontrado durante la realización del TFG ha sido el fallo del tomamuestras portátil. Este problema surgió durante uno de los últimos días de toma de datos. El tomamuestras no recogió todas las muestras que debía porque lo que ese día en concreto, no se pudo estudiar los diferentes parámetros.

En conclusión, este estudio ha servido para demostrar que la optimización del agua tratada puede tener un impacto significativo en la producción de biogás y en la eficiencia energética. No solo se ha beneficiado a la planta de tratamiento, sino que también a la protección del medio ambiente y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS a los que contribuye este trabajo de fin de grado son:

- Agua limpia y saneamiento (6)
- Energía asequible y no contaminante (7)
- Vida submarina (14)

Este trabajo de investigación ha sido una gran experiencia enriquecedora. Ha existido la oportunidad de aplicar los diferentes conocimientos teóricos obtenidos a un contexto práctico.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] *Estación depuradora de aguas residuales (EDAR)*. (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar.html>

[2] Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas

[3] Directiva 98/15/CE de la Comisión, de 27 de febrero de 1998, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I.

[4] Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura

[5] Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas

[6] 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

[7] Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas

[8] Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario

[9] Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental

[10] Ley 2/1992, de 26 de marzo, de saneamiento de las aguas residuales de la Comunidad Valenciana

[11] Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario

[12] Sanz, M. (3 de octubre de 2014). Digestión anaerobia de fangos de EDAR, problemas y soluciones. Aguas residuales.

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/digestion-anaerobia-de-fangos-de-edar-problemas-y-soluciones>

[13] Eduardo Ronzano, José Luis Dapena (2002). Tratamiento biológico de las aguas residuales. Pridesa

[14] E. Ortega, I. Tejero, A. Cajigas, E. Dewisme (2002). XX curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de Estaciones Depuradoras. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	<i>Introducción</i>	1
2.	<i>Presupuestos parciales</i>	1
2.1.	Recogida de muestras	1
2.2.	Material y equipos de laboratorio	2
2.3.	Mano de obra	2
3.	<i>Presupuesto total</i>	3

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto del material de recogida de muestras	1
Tabla 2. Presupuesto del material y equipos de la boratorio	2
Tabla 3. Presupuesto de la mano de obra	2
Tabla 4. Presupuesto total.	3

1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente presupuesto, se detalla el coste total de la realización del estudio anteriormente explicado. Para realizar este presupuesto, se han dividido los costes en tres partes. La primera parte del presupuesto recoge los costes de la recogida de las diferentes muestras. La segunda parte está formada por el coste de los equipos y materiales utilizados en el laboratorio. Por último, la tercera parte recoge el coste de la mano de obra que ha llevado a cabo el estudio.

Cabe destacar que los presupuestos se calcularán considerando que el estudio ha sido encargado.

2. PRESUPUESTOS PARCIALES

A continuación, se detallan los presupuestos por partes.

2.1. Recogida de muestras

En la siguiente tabla se ha desglosado el precio unitario de cada material utilizado para la recogida de muestras.

Tabla 1. Presupuesto del material de recogida de muestras

	UNIDADES	COSTE UNITARIO (€/ud)	COSTE TOTAL (€)
Botellas de plástico	131	0,7	91,7
Caja de Guantes	1	2,9	2,9
Bata	1	17	17
Tomamuestras HACH	1	4057	4057
Subtotal			4168,6

2.2. Material y equipos de laboratorio

En la tabla 2 se muestra el presupuesto de los equipos y material utilizados en el laboratorio.

Tabla 2. Presupuesto del material y equipos de laboratorio

	UNIDADES	COSTE UNITARIO (€/ud)	COSTE TOTAL (€)
Filtros	56	0,09	5,04
Pipeta Eppendorf 1000 µL	1	305	305
Pipeta Eppendorf 5000 µL	1	305	305
Kit DQO 514	3	145	435
Kit Ortofosfatos 350	3	185	555
Kit Amonio 303	3	158	474
Balanza de precisión	1	705	705
Estufa	1	2135	2135
Horno mufla	1	3050	3050
Bomba de filtración	1	885	885
Paquete de filtros de jeringuilla	3	36,85	110,55
Jeringuillas	56	0,145	8,14
Vasos de precipitado de 250 mL	56	1,34	75,04
Equipo de las instalaciones	1	500	500
Subtotal			9547,77

2.3. Mano de obra

En el siguiente presupuesto se detalla el coste de la mano de obra.

Tabla 3. Presupuesto de la mano de obra

	UNIDADES (Horas)	COSTE UNITARIO (€/ud)	COSTE TOTAL (€)
Técnico	100	18	1800
Subtotal			1800

3. PRESUPUESTO TOTAL

Por último, se obtiene el presupuesto final que corresponde todo el estudio realizado. A la suma de todos los presupuestos parciales se le debe añadir un 14% de gastos generales (electricidad, agua, mantenimiento del laboratorio, etc.) además de un 21% de IVA. Por lo tanto, el presupuesto total queda como:

Tabla 4. Presupuesto total.

Desglose	Coste total (€)
Material de recogida de muestras	4168,60
Material y equipos de laboratorio	9547,77
Mano de obra	1800,00
Presupuesto	15516,37
Gastos generales (14%)	2172,29
Presupuesto sin impuestos	17688,66
IVA (21%)	3714,61
Presupuesto total	21403,27

El **PRESUPUESTO TOTAL** es de **VEINTE Y UN MIL CUATROCIENTOS TRES EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS.**

DOCUMENTO 3:

ANEXO

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros de manera general.</i>	1
<i>Tabla 2. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 27 de mayo.</i>	2
<i>Tabla 3. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 28 de mayo.</i>	3
<i>Tabla 4. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 29 de mayo.</i>	4
<i>Tabla 5. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 30 de mayo.</i>	5
<i>Tabla 6. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 31 de mayo.</i>	7
<i>Tabla 7. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 3 de junio.</i>	8
<i>Tabla 8. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 5 de junio.</i>	9

Tabla 1. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros de manera general.

Δ Potencial Redox / 1,25 horas - DQO	0,0249
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - DQO SOL	0,1269
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - NH4	0,1459
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - SS	0,0003
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - PO4	0,0369
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - REDOX	0,0566

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	0,2140
Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO SOL	0,1624
Δ Potencial Redox / 1 hora - NH4	0,1609
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,1639
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	0,0292
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,2174

Δ Potencial Redox / 0,75 horas - DQO	0,0355
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - DQO SOL	0,0998
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - NH4	0,0151
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - SS	0,0688
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - PO4	0,0405
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - REDOX	0,0874

Δ Potencial Redox / 0,5 horas - DQO	0,2877
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - DQO SOL	0,2535
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - NH4	0,2462
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - SS	0,2366
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - PO4	0,2366
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - REDOX	0,3330

Δ Potencial Redox / 0,25 horas - DQO	0,0980
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - DQO SOL	0,0570
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - NH4	0,1492
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - SS	0,0546
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - PO4	0,036
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - REDOX	0,0187

27 de mayo ($Q_T=40301 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 2. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 27 de mayo.

Δ Potencial Redox / 1,25 horas - DQO	0,9236
Δ Potencial Redox / 1,25 horas -DQO SOL	0,6922
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - NH4	0,5080
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - SS	0,3157
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - PO4	0,8634
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - REDOX	0,8372
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - CAUDAL	0,8382

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	0,8753
Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO SOL	0,9109
Δ Potencial Redox / 1 hora - NH4	0,5706
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,5437
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	0,9469
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,8138
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	0,9827

Δ Potencial Redox / 0,75 horas - DQO	0,6122
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - DQO SOL	0,5389
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - NH4	0,0097
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - SS	0,4595
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - PO4	0,5198
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - REDOX	0,4559
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - CAUDAL	0,5765

Δ Potencial Redox / 0,5 horas - DQO	0,4293
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - DQO SOL	0,1175
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - NH4	0,0423
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - SS	0,2135
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - PO4	0,1469
Δ Potencial Redox / 0,5 horas – REDOX	0,3169
Δ Potencial Redox / 0,5 horas – CAUDAL	0,0519

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 0,25 horas - DQO	0,7329
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - DQO SOL	0,3974
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - NH4	0,1938
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - SS	0,1812
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - PO4	0,5676
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - REDOX	0,6058
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - CAUDAL	0,5362

28 de mayo ($Q_T=26047 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 3. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 28 de mayo.

Δ Potencial Redox / 1,25 horas - DQO	0,0868
Δ Potencial Redox / 1,25 horas -DQO SOL	0,1449
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - NH4	-0,0229
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - SS	-0,2672
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - PO4	0,0668
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - REDOX	-0,4795
Δ Potencial Redox / 1,25 horas - CAUDAL	0,0252

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	0,0376
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	0,1935
Δ Potencial Redox / 1 hora- NH4	0,0721
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	-0,0985
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	0,2689
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	-0,2588
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	-0,0518

Δ Potencial Redox / 0,75 horas - DQO	0,0224
Δ Potencial Redox / 0,75 horas -DQO SOL	0,3272
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - NH4	0,0342
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - SS	-0,1006
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - PO4	0,1966
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - REDOX	-0,1968
Δ Potencial Redox / 0,75 horas - CAUDAL	-0,0027

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 0,5 horas - DQO	-0,1163
Δ Potencial Redox / 0,5 horas -DQO SOL	-0,0375
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - NH4	-0,1855
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - SS	-0,2798
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - PO4	-0,0197
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - REDOX	-0,0593
Δ Potencial Redox / 0,5 horas - CAUDAL	-0,0413

Δ Potencial Redox / 0,25 horas - DQO	0,2679
Δ Potencial Redox / 0,25 horas -DQO SOL	0,4572
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - NH4	0,3470
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - SS	-0,0327
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - PO4	0,4256
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - REDOX	-0,4564
Δ Potencial Redox / 0,25 horas - CAUDAL	-0,0280

29 de mayo ($Q_T=28537 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 4. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 29 de mayo.

Δ Potencial Redox / 1.25 horas - DQO	-0,4092
Δ Potencial Redox / 1.25 horas -DQO SOL	-0,8656
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - NH4	-0,1434
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - SS	0,4477
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - PO4	-0,1899
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - REDOX	0,1726
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - CAUDAL	0,3354

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	0,5540
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	-0,7934
Δ Potencial Redox / 1 hora- NH4	0,5384
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,1093
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	0,5439
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,3493
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	0,7437

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 0.75 horas - DQO	0,8845
Δ Potencial Redox / 0.75 horas -DQO SOL	-0,4373
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - NH4	0,7379
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - SS	0,0135
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - PO4	0,8098
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - REDOX	0,39677
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - CAUDAL	0,5322

Δ Potencial Redox / 0.5 horas - DQO	0,4504
Δ Potencial Redox / 0.5 horas -DQO SOL	-0,8105
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - NH4	0,4157
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - SS	0,0749
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - PO4	0,3969
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - REDOX	0,2428
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - CAUDAL	0,7974

Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO	0,5261
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO SOL	-0,7355
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - NH4	0,3665
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - SS	0,0377
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - PO4	0,3631
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - REDOX	0,1353
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - CAUDAL	0,8038

30 de mayo ($Q_T=24511\text{m}^3/\text{día}$)

Tabla 5. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 30 de mayo.

Δ Potencial Redox / 1.25 horas - DQO	0,7825
Δ Potencial Redox / 1.25 horas -DQO SOL	-0,5007
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - NH4	-0,8699
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - SS	-0,7268
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - PO4	-0,6252
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - REDOX	0,7608
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - CAUDAL	0,0211

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	-0,9817
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	-0,9834
Δ Potencial Redox / 1 hora - NH4	-0,94
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,0502
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	-0,9995
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,9876
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	0,7738

Δ Potencial Redox / 0.75 horas - DQO	-0,9999
Δ Potencial Redox / 0.75 horas -DQO SOL	-0,9246
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - NH4	-0,9902
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - SS	-0,1575
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - PO4	-0,9713
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - REDOX	0,9987
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - CAUDAL	0,6261
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - DQO	-0,9578
Δ Potencial Redox / 0.5 horas -DQO SOL	-0,9966
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - NH4	-0,9013
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - SS	0,1496
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - PO4	-0,9977
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - REDOX	0,967
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - CAUDAL	0,8332

Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO	-0,9606
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO SOL	-0,9957
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - NH4	-0,9056
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - SS	0,1396
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - PO4	-0,9983
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - REDOX	0,9695
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - CAUDAL	0,8276

31 de mayo ($Q_T=31423 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 6. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 31 de mayo.

Δ Potencial Redox / 1.25 horas - DQO	-0,5507
Δ Potencial Redox / 1.25 horas -DQO SOL	0,1889
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - NH4	-0,8164
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - SS	0,8660
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - PO4	-0,8846
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - REDOX	0,9345
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - CAUDAL	0,9838

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	-0,5507
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	0,1889
Δ Potencial Redox / 1 hora- NH4	-0,8164
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,8660
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	-0,8846
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,9345
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	0,9838

Δ Potencial Redox / 0.75 horas - DQO	0,8949
Δ Potencial Redox / 0.75 horas -DQO SOL	0,9521
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - NH4	0,6715
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - SS	0,3922
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - PO4	0,5693
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - REDOX	-0,4657
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - CAUDAL	0,0595

Δ Potencial Redox / 0.5 horas - DQO	0,4052
Δ Potencial Redox / 0.5 horas -DQO SOL	0,9286
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - NH4	0,0453
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - SS	0,8885
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - PO4	-0,0851
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - REDOX	0,205
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - CAUDAL	0,6819

Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO	0,9768
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO SOL	0,8486
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - NH4	0,8322
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - SS	0,1555
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - PO4	0,7529
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - REDOX	-0,6678
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - CAUDAL	-0,1862

3 de junio ($Q_T=43518 \text{ m}^3/\text{día}$)

Tabla 7. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 3 de junio.

Δ Potencial Redox / 1.25 horas - DQO	0,6644
Δ Potencial Redox / 1.25 horas -DQO SOL	0,7333
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - NH4	0,6534
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - SS	0,5705
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - PO4	0,8421
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - REDOX	-0,4403
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - CAUDAL	0,4683

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	-0,6309
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	-0,5484
Δ Potencial Redox / 1 hora- NH4	-0,9555
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	-0,3986
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	-0,7806
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	0,7497
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	-0,0265

Δ Potencial Redox / 0.75 horas - DQO	0,4304
Δ Potencial Redox / 0.75 horas -DQO SOL	0,4821
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - NH4	0,5809
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - SS	0,2677
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - PO4	0,7795
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - REDOX	-0,4224
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - CAUDAL	0,2336

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 0.5 horas - DQO	0,7118
Δ Potencial Redox / 0.5 horas -DQO SOL	0,7536
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - NH4	0,7062
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - SS	0,5792
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - PO4	0,8951
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - REDOX	-0,4909
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - CAUDAL	0,3589

Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO	0,5051
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO SOL	0,5581
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - NH4	0,4834
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - SS	0,3803
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - PO4	0,7752
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - REDOX	-0,3259
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - CAUDAL	0,2338

5 de junio ($Q_T=44746\text{m}^3/\text{día}$)

Tabla 8. Correlación entre el incremento de potencial redox y los parámetros en el día 5 de junio.

Δ Potencial Redox / 1.25 horas - DQO	0,6442
Δ Potencial Redox / 1.25 horas -DQO SOL	0,5964
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - NH4	0,9286
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - SS	0,9321
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - PO4	0,5407
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - REDOX	-0,9089
Δ Potencial Redox / 1.25 horas - CAUDAL	0,5554

Δ Potencial Redox / 1 hora - DQO	0,8171
Δ Potencial Redox / 1 hora -DQO SOL	0,7805
Δ Potencial Redox / 1 hora- NH4	0,9924
Δ Potencial Redox / 1 hora - SS	0,9935
Δ Potencial Redox / 1 hora - PO4	0,7364
Δ Potencial Redox / 1 hora - REDOX	-0,9849
Δ Potencial Redox / 1 hora - CAUDAL	0,7482

Optimización de la decantación primaria en la línea de aguas para la mejora del consumo energético en el reactor biológico y calidad del biogás obtenido en la línea de fangos para una EDAR de 450.000 HE

Δ Potencial Redox / 0.75 horas - DQO	0,0492
Δ Potencial Redox / 0.75 horas -DQO SOL	0,1099
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - NH4	-0,4274
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - SS	-0,4359
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - PO4	0,1769
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - REDOX	0,3817
Δ Potencial Redox / 0.75 horas - CAUDAL	0,1596

Δ Potencial Redox / 0.5 horas - DQO	0,6977
Δ Potencial Redox / 0.5 horas -DQO SOL	0,6528
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - NH4	0,953
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - SS	0,9558
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - PO4	0,5999
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - REDOX	-0,9367
Δ Potencial Redox / 0.5 horas - CAUDAL	0,6139

Δ Potencial Redox / 0.25 horas - DQO	0,7241
Δ Potencial Redox / 0.25 horas -DQO SOL	0,6808
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - NH4	0,9637
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - SS	0,9662
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - PO4	0,6296
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - REDOX	-0,9492
Δ Potencial Redox / 0.25 horas - CAUDAL	0,6432